



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VYUŽITÍ ADITIVNÍ TECHNOLOGIE PRO NÁVRH A
VÝROBU PROTOTYPU OČNÍ PROTÉZY**

USE OF ADDITIVE TECHNOLOGY FOR THE DESIGN AND PRODUCTION OF EYE PROSTHESIS
PROTOTYPE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Vocílka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Ondřej Vocílka**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Využití aditivní technologie pro návrh a výrobu prototypu oční protézy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se bude zabývat výrobou prototypu oční protézy z biokompatibilního materiálu na základě 3D modelu získaného skenováním akrylátové protézy. Součástí práce bude charakteristika aditivní technologie Rapid Prototyping, spojená s popisem komerčně dostupných aditivních materiálů a jejich aplikačním využitím. Výroba prototypu oční protézy bude realizována na 3D tiskárně (technologie PolyJet) s využitím aditivní technologie Rapid Prototyping. Práce bude ukončena technicko–ekonomickým zhodnocením a rozbořem navržených variant výroby.

Cíle diplomové práce:

- Teoretická část (rozdělení, charakteristika očních protéz).
- Charakteristika technologie Rapid Prototyping a rozbor aplikovaného aditivního materiálu.
- Experimentální část (tvorba modelu akrylátové protézy a výroba prototypu oční protézy).
- Technicko–ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

CHUA, C. K., LEONG, K. F., LIM, C. S. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, c2010. 512 pp. ISBN 978-981-277-897-0.

JACOBSON, D. M., RENNIE, A. E. W., BOCKING C. E. In Proceedings of the 5th National Conference on Rapid Design, Prototyping, and Manufacture. Professional Engineering Publishing, 2004. pp. 112. ISBN 186-058-465-9.

SLOTA, J., MANTIČ, M., GAJDOŠ, I. Rapid Prototyping a Reverse Engineering v strojárstve. 1. vyd. Košice: Strojnícká fakulta, Technická univerzita v Košiciach, 2010. 207 s. ISBN 978-80-553-0548-6.

GEBHARDT, A. Rapid Prototyping. 1st edition. [s.l.]: Hanser Gardner Publications, 2003. 379 s. ISBN 3-446-21259-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce má za cíl vyrobit prototyp estetické protézy výhradně za použití aditivní technologie Rapid Prototyping a prozkoumat možnost využití komerčně dostupných biokompatibilních materiálů. V teoretické části práce je popsáno rozdělení očních protéz se zaměřením na estetické oční protézy. Praktická část práce nabízí ucelený pohled na celý proces výroby prototypu. Popisuje tak získání modelu 3D skenováním, geometrické úpravy modelu, mapování textur, optimalizaci tisku a tisk samotný. Závěr práce tvoří diskuze zaměřená na hodnocení vyrobeného prototypu, technicko-ekonomické zhodnocení, návrh budoucího postupu a návrh současného využití vytvořené metody.

Klíčová slova

oční protézy, PolyJet, Stratasys J750, 3D tisk oční protézy, Rapid Prototyping

ABSTRACT

This diploma thesis has an aim to fabricate a prototype of esthetical prosthesis using solely Rapid Prototyping additive technology and to explore the possibility of using commercially available biocompatible materials. In the theoretical part, a description of types of ocular prosthesis types with the focus being on esthetic ocular prosthesis is given. The practical part of the work offers a comprehensive view on the whole process of the prototype fabrication. It provides a description of creating the 3D model by scanning, geometrical adjustments of the model, textures mapping, print optimization and the printing itself. The closing part of the thesis consists of a discussing focused on an evaluation of the fabricated prototype followed by technical-economical assesment, a proposal of next steps, and a proposal of current usage of the created method.

Key words

eye prosthesis, PolyJet, Stratasys J750, 3D printing of eye prosthesis, Rapid Prototyping

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VOCÍLKA, Ondřej. *Využití aditivní technologie pro návrh a výrobu prototypu oční protézy* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117245>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Využití aditivní technologie pro návrh a výrobu prototypu oční protézy** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Ondřej Vocílka

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Josefu Sedlákov, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi věnoval při vypracování diplomové práce a rovněž Tobiasovi Rittigovi, B.Sc., M.Sc. a doc. Ing. Jaroslavovi Křivánkovi, Ph.D. z Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy za pomoc s optimalizací tisku a tiskem samotným. Dále také Bc. Viktoru Végnerovi a společnosti MCAE Systems, s.r.o. za možnost realizování 3D tisku.

Také bych tímto chtěl poděkovat své přítelkyni, přátelům a rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

| | |
|---|----|
| ABSTRAKT | 3 |
| PODĚKOVÁNÍ..... | 5 |
| OBSAH..... | 6 |
| ÚVOD | 8 |
| 1 TEORETICKÁ ČÁST | 9 |
| 1.1 Rozdělení očních protéz | 9 |
| 1.1.1 Ochranné protézy | 9 |
| 1.1.2 Léčebné protézy..... | 9 |
| 1.1.3 Kontaktní protézy | 9 |
| 1.1.4 Lokalizační protézy | 10 |
| 1.1.5 Estetické protézy..... | 10 |
| 1.2 Indikace k použití estetických očních protéz..... | 11 |
| 1.3 Historie estetických očních protéz..... | 11 |
| 1.4 Skleněné estetické oční protézy | 12 |
| 1.4.1 Materiál na výrobu skleněných estetických protézy | 12 |
| 1.4.2 Postup výroby skleněných estetických protéz..... | 13 |
| 1.4.3 Životnost skleněných estetických protéz..... | 14 |
| 1.4.4 Výhody a nevýhody skleněných estetických protéz | 14 |
| 1.5 Akrylátové estetické oční protézy | 14 |
| 1.5.1 Materiál na výrobu akrylátových estetických protéz..... | 14 |
| 1.5.2 Postup výroby akrylátových estetických protéz | 15 |
| 1.5.3 Životnost akrylátových estetických protéz | 16 |
| 1.5.4 Výhody a nevýhody akrylátových estetických protéz..... | 16 |
| 1.6 Skladové estetické oční protézy | 17 |
| 2 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE..... | 18 |
| 2.1 Technologie PolyJet™ | 18 |
| 2.2 Tiskárny využívající PolyJet technologii | 19 |
| 2.3 Materiály pro technologii PolyJet™ | 20 |
| 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | 21 |
| 3.1 Skenování skleněné protézy | 21 |
| 3.2 Geometrické úpravy modelu | 24 |
| 3.3 Vytvoření textur | 27 |
| 3.4 Mapování modelu a aplikace textur | 28 |
| 3.5 Zpracování a optimalizace modelu..... | 33 |
| 3.6 Tisk prototypu | 35 |
| 4 DISKUZE | 40 |

| | |
|--|----|
| 4.1 Zhodnocení vytvořených prototypů a provedených operací | 40 |
| 4.2 Ekonomické zhodnocení výroby prototypu | 41 |
| 4.3 Návrh budoucího postupu výroby protéz 3D tiskem..... | 42 |
| 4.4 Návrh využití současného postupu výroby | 44 |
| ZÁVĚR | 45 |
| SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 46 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 49 |

ÚVOD

3D tisk se v medicínské oblasti začal používat již v polovině devadesátých let. Rozšíření do denní praxe v nemocnicích a soukromých zařízeních po celém světě se ale dočkalo až v posledním pěti letech.

Laboratoře vybavené 3D tiskárnami se začínají objevovat napříč všemi lékařskými odvětvími. Aby výrobci tiskáren jako je např. Stratasys Ltd. vyhověli potřebám medicínského 3D tisku, začali vyvíjet tiskárny, které dokáží tisknout barevné modely a kombinovat různé materiály [1].

Tato diplomová práce navazuje na předchozí bakalářskou práci *Návrh a výroba oční protézy 3D tiskem* z roku 2017, kde byly položeny základy pro výrobu estetických očních protéz využitím postupů reverzního inženýrství.

V předchozí práci byla vybrána a ověřena vhodná aditivní technologie pro výrobu očních protéz. Výsledkem byl prototyp oční protézy, jehož jádro bylo vytisknuto na 3D tiskárně Stratasys J750 pomocí technologie PolyJet. Na tento vytisknutý model bylo po vzoru ruční výroby umístěno žilkování a následně nanášena vrstva čirého akrylátu [2].



Obr. 0.1 Konečný prototyp z bakalářské práce.

Hlavním cílem této diplomové práce je vyrobit pokročilejší prototyp estetické oční protézy výhradně za využití aditivní technologie pouze s následnou povrchovou úpravou.

Dalším cílem je prozkoumání možnosti využití komerčně dostupných biokompatibilních materiálů, které Stratasys Ltd. pro tiskárny s technologií PolyJet nabízí.

1 TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část se věnuje rozdělení očních protéz, které se v lékařské praxi používají. Vzhledem k zaměření této práce na výrobu prototypu estetické protézy se teoretická část podrobněji zaměřuje na tento typ náhrad. Popisuje jejich historii a postup výroby těchto náhrad.

Estetické protézy mají zásadní roli při překonání traumatu ze ztráty zraku a zlepšují zejména sociální kvalitu života. Proto je důležité, aby měla vyrobená náhrada co nejvěrohodnější vzhled a po nasazení působila přirozeně.

1.1 Rozdělení očních protéz

Oční protézy slouží nejčastěji jako estetická náhrada odstraněného oka a rozdělují se podle funkce. Nejde jen o oční protézy nahrazující enukleované, eviscerované oko nebo kompletní ektoprotézy, které slouží k nahrazení odstraněné oční bulvy a okolních tkání. Patří sem i obarvené kontaktní čočky pro případy, kdy nebylo nutné odstranění chirurgickým zákrokem a léčebné nebo diagnostické protézy, které se používají při ošetření zranění [3, 4, 5].

1.1.1 Ochranné protézy

Tyto protézy plní ochrannou funkci během lékařských vyšetření, při kterých dochází k ozařování, jako je např. rentgen. Před jejich nasazením se provádí lokální umrtvení. Mají podobu tenké skořápky, zasahují až do oblasti spojivkových řas a materiály pro jejich výrobu jsou kovy. Jejich účelem je ochrana před průnikem záření do oka [3, 4, 5].

1.1.2 Léčebné protézy

Tyto protézy se používají pro doléčování pooperačních stavů v oblasti předního segmentu oka. Zabraňují srůstům spojivky a tím umožňují aplikaci léčiv a výplach oka. Udržují také spojivkový vak otevřený a usnadňují pozdější vložení estetické protézy. Vyrábějí se v široké škále tvarů a velikostí a řadíme mezi ně formátory a proplachovací protézy.

Formátory vzhledem připomínají estetické oční protézy s kruhovým otvorem v oblasti duhovky. K jejich výrobě se používá sklo nebo akrylát. Existuje 5 základních velikostí v průměru od 10 do 30 mm, vždy v provedení pro pravé a levé oko. Slouží k zabránění stažení zbylých očních tkání.

Proplachovací oční protézy se používají např. po popálení a poleptání, slouží k vypláchnutí spojivkového vaku a brání srůstům. Tvarem se podobají kontaktním čočkám a mají navíc vývod a přívod pro průchod proplachovací tekutiny [3, 4, 5].

1.1.3 Kontaktní protézy

Jde o speciální druh kontaktních čoček. Využívají se např. u pacientů s nevidomým okem, které není bolestivé, je tvarově v pořádku a nebylo tedy třeba přistoupit k jeho odstranění. Mají čistě kosmetickou funkci. Mezi tyto protézy můžeme zařadit mikročočky a skleněné čočky, obyčejné zbarvené čočky, kosmetické náhrady a ručně barvené čočky. Ty se vyrábějí v široké škále tvarů a velikostí a již obsahují zornici, duhovka se následně individuálně dobarvuje. Lze vybírat podle situace z čoček

měkkých a tvrdých. Nároky na jejich údržbu jsou stejné jako u standardních kontaktních čoček [3, 4, 5].

1.1.4 Lokalizační protézy

Tyto protézy slouží k lokalizaci cizích nitroočních kovových těles. Poloha cizího tělesa je při rentgenovém snímkování díky výraznému kontrastu dobře viditelná. Kvůli nízké měrné hmotnosti očních tkání se pro přesné určení polohy a tvaru tělesa na snímcích využívají lokalizátory. Na jejich povrchu jsou umístěny zpravidla čtyři referenční body z kontrastního materiálu, kterým je většinou olovo. Díky těmto bodům je vytvořen kartézský souřadný systém, ve kterém je zanesena poloha cizího tělesa. Oko je snímkováno v předozadní a boční projekci nebo se provede počítačová tomografie. Protézy se nasazují při lokální anestezii před začátkem vyšetření. Po nasazení na oko se během snímkování z dvojic bodů získá horizontální a vertikální osa pro souřadný systém. Kvůli možné přítomnosti následků zranění, jako jsou např. stehy, nelze zaručit dokonalé umístění. K těmto lokalizátorům řadíme Baltinovy a Combergovy protézy.

Baltinovy protézy se již nepoužívají. Vyráběly se z lehkých kovů, hlavně z hliníku a měly tvar kulového vrchlíku s kruhovým otvorem uprostřed a olovenými referenčními body v okrajové oblasti.

Combergovy protézy se vyrábějí z akrylátu nebo skla, tvarem připomínají kontaktní čočku s otvorem uprostřed. Čtveřice olovených bodů je pravidelně rozmístěna do kruhu ve vzniklém prstenci [3, 4, 5].

1.1.5 Estetické protézy

Estetické oční protézy, také nazývané kosmetické, jsou vyráběny ze skla nebo polymethylmethakrylátu, který je označován i jako plexisklo, akrylátové sklo nebo jen akrylát. Slouží zejména jako náhrada za vyjmuté oko. Mohou mít kulovitý tvar nebo skořápkovitý. Nejlepší pohyblivost mají zpravidla protézy, které jsou nasazeny přes nevidomé oko. Další možností zlepšení mobility je použití implantátu, který je přišit k přímým očním svalům během odstranění oka.

Mezi tyto protézy se také řadí ektoprotéza, která nahrazuje oko a jeho okolí. Jde např. o případy, kdy při operaci zhoubného nádoru bylo třeba odstranit i oční víčka a standardní protézu by tak nebylo možné použít.

Estetické protézy lze rozdělit [6]:

- a) Na základě použitého materiálu pro výrobu:
 - skleněné oční protézy,
 - polymethylmethakryátové [PMMA] protézy.
- b) Na základě způsobu výroby:
 - protézy vyrobené na míru,
 - skladové [Stock] protézy.

1.2 Indikace k použití estetických očních protéz

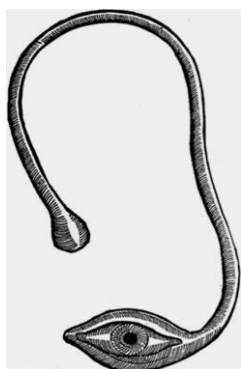
Důvod k používání očních protéz jsou hlavně poranění oka a dlouhodobé onemocnění, které vyústilo v potřebu odstranění oční bulvy. Chirurgickými zákroky využívanými pro tyto účely jsou enukleace, eviscerace, exenterace a orbitectomie. Všechny tyto operace jsou nevratného charakteru a představují výrazný zásah do života pacienta. Přistupuje se k nim až jako k poslední možnosti v případech, kdy je např. nutné zabránit šíření rakoviny nebo je nevidoucí oko pro pacienta příliš bolestivé [4, 5].

1.3 Historie estetických očních protéz

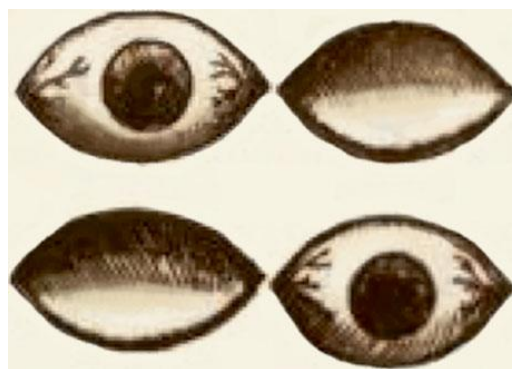
Historie očních protéz má překvapivý počátek v mýtech starověkého Egypta u boha slunce Hóra, během války mezi Dolním a Horním Egyptem kolem roku 3000 před naším letopočtem. V průběhu války mu jeho bratr Seth, patron Dolního Egypta, vytrhl levé oko a roztrhal ho na kusy. To pak bylo znovu složeno bohem moudrosti a magie Thohtem, který se tak stal „prvním očním protetikem“. Horovo oko se pak stalo symbolem ochrany a jedním z nejdůležitějších symbolů moci.

První archeologický nález spojený s očními protézami pochází z období mezi 2900-2800 př.n.l. Šlo o protézu vyrobenou z živice a tenkým povlakem zlata na povrchu, která se nosila stejně jako páska přes oko. Další nálezy primitivních očních protéz pocházejí z pátého století, kde byly vyráběny z namalovaného jílu připevněného k látce nebo kůži a byly také nošeny vně očního důlku. Z následujících dvou tisíciletí se nedochovaly žádné záznamy a důkazy o očních protézách a jejich vývoji.

V 16. století popsal Ambrosie Paré oční protézu připevněnou ke konci zahnuté kovové tyči, která ji po nasazení na hlavu držela ve správné pozici. Paré je také spojován s první protézou nošenou uvnitř očního důlku (viz obr. 1.2), ty se vyráběly ze zlata a stříbra s barevnými emaily na povrchu. Tento typ protéz jím byl pouze popsán a je možné, že již existovaly předtím. Avšak nejsou žádné důkazy, které by to potvrzovaly.



Obr. 1.1 Kresba oční protézy [7].



Obr. 1.2 Protézy nošené uvnitř očního důlku [7].

Na konci 16. století se začaly vyrábět realističtější skleněné protézy v Benátkách. Protézy měly tvar tenké skořápky a uvnitř byly plné, narozdíl od dutých náhrad, které se začaly vyrábět později. Jejich nevýhodou byla zejména křehkost a mohly být také velice nepohodlné. Postup výroby byl dlouho držen v úzkém kruhu výrobců při snaze

o monopolizaci. Existuje i záznam o zavraždění dvou výrobců, které se pokoušel nalákat císař Leopold I. do Německa.

V následujících dvou stoletích se výroba skleněných náhrad rozšířila po Evropě a zbytku světa. Díky svým přednostem vytlačila produkci kovových protéz, a sklo se tak stalo jediným materiálem pro jejich výrobu.

O rozšíření výroby v Německu se zasloužil Friedrich Philipp Ritterich (1787–1866), doktor a učitel na Lipské Univerzitě, který si původně protézy nechal dovážet z Paříže. Organizoval hodiny, kde se němečtí skláři mohli učit protézy vyrábět. Díky tomu už nemusely být protézy dováženy a pacientovi se mohla protéza vyrobit na míru. V polovině 19. století se tak centrum výroby skleněných protéz přesunulo do Německa, kde sklář Ludwig Müller-Uri vyvinul protézu z kryolitové skla, která byla odolnější než všechny předchozí skleněné náhrady. Z Německa se výroba skleněných protéz po První světové válce rozšířila i do tehdejší Československé republiky. Tyto protézy se začaly produkovat v Jablonci nad Nisou, kde se vyrábějí dodnes.

V roce 1930 byl představen nový materiál polymethylmethakrylát [PMMA] a jeho zdravotně nezávadná verze se začala brzy používat v oblasti dentálních náhrad. Poté co na začátku Druhé světové války nebylo možné dovážet do Anglie a USA materiál na výrobu protéz a samotné protézy, začali v obou zemích pracovat na vhodné náhradě. Ve stejnou dobu tak byly vyrobeny první akrylátové protézy techniky z Královského námořnictva a Fritzem Jardonem, německým zubním laborantem, který emigroval do USA. V obou zemích byly založeny instituce na výrobu očních protéz pro veterány vracující se z války.

PMMA pak postupně nahradilo sklo jako hlavní surovina pro výrobu očních náhrad, a to zejména díky své odolnosti. Postup výroby akrylátových protéz také poprvé umožnil výrobu pomocí odlitku pacientova očního důlku, a tím tak ještě více tvar protézy upravit podle jeho potřeb [2, 7].

1.4 Skleněné estetické oční protézy

Produkce estetických skleněných protéz se začala s nástupem akrylátových náhrad postupně ztrácet a dnes se vyrábějí jen v některých oblastech Evropy. Rozlišujeme protézy vyrobené na pacientovi na míru a protézy skladové, které se vyrábějí v sériích pro oční oddělení nemocnic a pro umělecké a další komerční účely, jako je např. jejich instalace do soch a figurín [5, 7].

1.4.1 Materiál na výrobu skleněných estetických protéz

Materiály pro výrobu těchto protéz musí být samozřejmě zdravotně nezávadné z důvodu dlouhodobého kontaktu se spojivkou. Na všechny použité materiály jsou také kladeny požadavky na dostatečnou homogenitu, zpracovatelnost a stejnou tepelnou roztažnost a dělí se do následujících tří skupin [8]:

- Speciální opálové sklo na výrobu oční koule bez obsahu těžkých kovů, jako je kadmium a olovo.
- Barevné tyčinky s malým průměrem na vytvoření duhovky a žilkování, která vzájemným mísením vytváří požadovanou barvu.
- Čirý krystal na rohovku, který slouží k překrytí duhovky pro dosažení přirozené hloubky pohledu.

Dalším používaným materiálem je také kryolitové sklo. [4]

1.4.2 Postup výroby skleněných estetických protéz

K výrobě skleněných očních protéz se používají sklářské nástroje jako je upravený sklofoukačský kahan, pinzety, kleště a hladítka. Jde o velice precizní a náročnou práci, která vyžaduje barvocit, zručnost, určitou míru talentu a zejména léta praxe.

Proces výroby začíná vybráním vhodného tvaru protézy, kdy si pacient zkouší různě tvarované protézy ze sady, kterou má protetik k dispozici. Po zvolení vyhovujícího tvaru se provede změření průměru duhovky posuvným měřítkem. Na vybrané vzorové protéze protetik označí vhodné místo pro umístění duhovky tak, aby po nasazení poloha odpovídala co nejvíce symetrii obličeje.

Kahanem se nahřeje přibližně 20 mm dlouhá část opálové trubice z materiálu na oční kouli a je z ní odebrán odtážek. Z něj se vyfoukne koule o velikosti pacientova oka, na kterou se po odstranění vzniklé trubičky z jedné strany natavuje základní barva. Na vrchlík koule se pak natavují tenké barevné tyčinky o průměru 2 mm, které postupně utvářejí duhovku. Barva duhovky by měla odpovídat zdravému oku pacienta, což si protetik může zkontrolovat přímo nebo případně z fotografické dokumentace.

Nejtěžší je napodobování modrých a zelených duhovek, snáze se pak vytvářejí černé nebo hnědé. Poté co je dosaženo vyhovující barvy duhovky, nataví se zornice z černého skla a přes duhovku se zornicí je přidán čirý materiál pro rohovku. Z červeného materiálu se následně na povrchu vytvoří žilkování a vše se zataví kvůli vyhlazení povrchu, odtaví se zadní část a protéza se dá chlazit do předeřátého grafitového kelímku.

Vyrobená protéza se nedá nijak upravovat a opravovat, proto je většinou třeba několika pokusů, než se dosáhne uspokojivého výsledku, jehož tvar je pro pacienta pohodlný. Postup výroby se může u jednotlivých výrobců drobně lišit v pořadí operací, ale výsledné protézy jsou srovnatelné [2, 3, 4, 5].



Obr. 1.3 Ukázka skleněné protézy.

1.4.3 Životnost skleněných estetických protéz

Skleněné estetické protézy se dají používat po dobu půl až jednoho roku, než je nutné vyrobit novou. Hlavním důvodem pro výměnu protézy je znehodnocení povrchu, který narušuje prostředí panující uvnitř očního důlku. Povrch protézy se tak zdrsňuje a protéza se stává nepohodlnou. Tyto náhrady jsou také náchylnější na poškrábání, a to jednak při manipulaci a také v případech, kdy cizí těleso, jako jsou zrnka prachu a jiné nečistoty vniknou pod víčko. Takto vzniklá poškození mohou poškodit oční důlek a spojivky pacienta. Způsobují dráždění, které vede k zvýšené produkci slz a je vhodné protézu vyměnit [2, 4, 5].

1.4.4 Výhody a nevýhody skleněných estetických protéz

Hlavní výhodou skleněných očních protéz je živý lesk povrchu, který dosahuje lepších kvalit než u akrylátových náhrad a dotváří přirozený vizuální vzhled. Na rozdíl od akrylátových protéz u nich nehrozí alergická reakce. Drsnost povrchu je menší než u akrylátových náhrad. Dalšími výhodami jsou stálost barev a hloubkový dojem duhovky.

Podstatnou nevýhodou je zejména křehkost a s tím spojená možnost poranění v případě, že dojde k prasknutí protézy během nošení. Stejně tak hrozí poškození během nasazování a vyndávání protézy. Povrch protéz je postupně narušován chemickým vlivem slz a případným poškrábáním, které se nedá odstranit. Rušivý dojem má při pohledu z blízka zornice, která je mírně předsazená před duhovkou. V neposlední řadě mezi nevýhody patří to, že skleněné protézy není možné po vyrobení nijak upravovat a také že v zimě studí více než akrylátové [3, 4, 5].

1.5 Akrylátové estetické oční protézy

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.3, akrylátové oční protézy se začaly vyrábět v průběhu druhé světové války a rychle díky svým přednostem nahradily skleněné protézy. Stejně jako u skleněných je možnost výroby na míru pro pacienta anebo hromadná výroba skladových protéz.

1.5.1 Materiál na výrobu akrylátových estetických protéz

Pro výrobu akrylátových očních protéz se používá čiré, bílé a černé PMMA lékařské kvality, které má vysokou odolnost vůči působení prostředí v očním důlku. Pro malbu duhovky se používají olejové barvy s vysokou trvanlivostí, jejichž základní paleta barev je černá, bílá, hnědá, modrá, okrová a oranžová. Na malbu se používají jemné štětce ze sobolí srsti. Na vytvoření žilkování se používají vyčesaná vlákna z červené bavlny, které se následně nalepí na povrch budoucí protézy.

Potřeba je také formovací plastická hmota na výrobu formy a případně vosky pro výrobu otisku očního důlku [2, 7].

1.5.2 Postup výroby akrylátových estetických protéz

Výroba akrylátových estetických protéz se dá rozdělit na základě způsobu získání tvaru pro výrobu formy na odlévání PMMA. Jednou možností je obdobně jako u skleněných náhrad využít sadu protéz, které má protetik k dispozici, a z nich si pacient vybere vhodný tvar. Toho se využívá např. u pacientů, kteří stále mají nevidoucí oko a rozhodli se nosit protézu z kosmetických důvodů.

Nebo se dá využít metoda, během níž je vytvořen voskový otisk očního důlku, jež slouží jako základ pro vytváření protézy. Tato metoda je samozřejmě pro pacienty, u kterých již proběhl chirurgický zákrok pro odstranění oka.

Celý proces je možné provést během jednoho sezení trvajícího přibližně 8 hodin nebo může být rozložen do několika na sebe navazujících setkání.

Prvním krokem je výroba otisku očního důlku. Pacient je poučen o celém procesu a usazen do pohodlné polohy. Přípravek používaný na výrobu otisku se podobá tvaru protézy, ale má v přední části otvor pro vtlačení tmelu do důlku. Pacient si přípravek nasadí a skrz otvor je pomocí pistole vtlačen tmel. Před zatuhnutím tmelu a vyndáním otisku musí pacient sedět v klidu s upřeným pohledem a otevřenými očními víčky.

Následuje výroba a malba duhovkového disku. Potřebný průměr duhovky se získá posuvným měřítkem z pacientova zdravého oka a tento rozměr bývá zpravidla zmenšen o 0,5 mm kvůli zakřivení rohovky. Disky, na kterých se provádí malba, je možné vyrobit z černého za studena vytvrditelného PMMA anebo zakoupit ve vybraných rozměrech. Na tento disk se někdy připevňuje prut z vosku pro jednodušší manipulaci během malování.

Malování duhovky je nejnáročnější částí výroby, ke které je třeba mít výborný barvocit, talent a zkušenosti protetika. Dojde k míchání barev tak, aby výsledek co nejvíce odpovídal barvě pacientova oka a samotnému malování, ke kterému se často používá zvětšovací lampa. Do první vrstvy se někdy přidávají přípravky na urychlení schnutí.

V průběhu malování duhovky se opakovaně zkouší vzhled přiložením rohovky, která má odpovídající průměr. Některé rohovky mohou mít také již namalovanou zornici, pokud ji neobsahují, tak je dodatečně přidána na duhovku. Po dosažení požadovaného vzhledu a zaschnutí malby je rohovka spojena s duhovkou. Tato duhovko/rohovková jednotka je následně vyleštěna.

Pomocí otisku důlku je vyrobena z plastické hmoty dvoudílná forma, do které je po případných úpravách následně odlit vosk. Odlitek je po vyjmutí zbaven přebytečného materiálu a vložen do pacientova důlku.

Podle potřeb pacienta je ubírán nebo případně přidáván materiál pro dosažení co nejpohodlnějšího pocitu. Na odlitku je označeno vhodné místo pro umístění duhovko/rohovkové jednotky tak, aby odpovídalo symetrii obličeje. Po vybrání místa je zde vytvořen otvor, do kterého je jednotka vložena. Pacient si takto upravený odlitek vyzkouší, pokud umístění není vyhovující, je otvor uzavřen a vytvořen nový, dokud není dosaženo uspokojivého umístění.

Z voskového odlitku s otvorem je vytvořena dvoudílná forma z plastické hmoty v kovovém přípravku na odlití akrylátu. Do vzniklé formy je odlit bílý akrylát a po vytvrzení proběhne přebroušení vzniklého odlitku. V některých případech je také upraven otvor pro vložení duhovko/rohovkové jednotky.

Na bílém akrylátovém odlitku je dobarveno okolí duhovky a skléry a nalepí se jemné žilkování z vyčesané červené bavlny. Vše je nutné provést tak, aby protéza odpovídala pacientovu zdravému oku. Po dosažení požadovaného výsledku je upravený odlitek s vloženou duhovkou a rohovkou zalit do čirého PMMA.

Výsledný tvar se důkladně přeleští a odstraní se případně povrchové nerovnosti nebo přebytečný materiál ze zalití. Pacient si protézu vyzkouší a podle jeho potřeb je možné tvar dalším broušením a leštěním upravit. Výslednou protézu by měl přibližně po měsíci nošení protetik prohlédnout a případně dopravit.

Na výrobu estetických očních protéz je možné zakoupit řadu polotovárů, které proces výroby urychlují a snižují náklady na zavedení výroby. Avšak např. použitelnost u přemalovaných duhovek apod. je omezená a individuální výrobou je možné dosáhnout vyšší přirozenosti protézy [2, 7].



Obr. 1.4 Ukázka akrylátové protézy.

1.5.3 Životnost akrylátových estetických protéz

Životnost akrylátových protéz se pohybuje v rozmezí dvou až tří let, což je do značné míry ovlivněno individuálním prostředím v očním důlku pacienta. Proto jsou někteří uživatelé schopni nosit protézy i déle do té doby, než jim tvar anebo barva přestanou vyhovovat. Proto by měla u protéz starších tří let proběhnout kontrola tvaru, tvrdosti a drsnosti povrchu a prověřit, zda nedochází k oddělování jednotlivých vrstev v oblasti duhovky.

Důležitým faktorem z hlediska životnosti je postupné blednutí barev duhovky, které vede ke změnám barev. To vyústí v nesymetrii vzhledem ke zdravému oku pacienta. Všechny tyto faktory by se měly kontrolovat protetikem v rozmezí 12 měsíců, aby se předešlo možným komplikacím.

Životnost protézy je také možné prodloužit pravidelnou údržbou a základem je osobní hygiena, jako jsou umyté ruce při manipulaci, což snižuje riziko zanesení infekce do očního důlku. Doporučuje se protézu alespoň jednou denně vyjmout a důkladně ji omýt. Vhodné je také mít v oblasti, kde dochází k časté manipulaci s protézou, umístit měkkou podložku, která zabrání poškození v případě pádu [2, 5].

1.5.4 Výhody a nevýhody akrylátových estetických protéz

Značnou výhodou oproti skleněným protézám je možnost přeleštění povrchu protézy a tím jeho zjemnění, který už byl nevyhovující pro nošení. Tou největší je však odolnost proti poškození při pádech a nárazech.

Nevýhodou je pak vyblednutí barev z důvodu působení slunečního záření, proto je vhodné zejména v létě nosit sluneční brýle, a tím blednutí barev zpomalit [2].

1.6 Skladové estetické oční protézy

Skladové protézy mohou být jak skleněné, tak akrylátové a jsou hromadně produkovány v omezené škále tvarů, velikostí a barev pro levé a pravé oko. Jejich výroba je rychlá a méně nákladná než u protéz vyrobených na míru. Tomu odpovídá i výsledný estetický vzhled a funkčnost, které nedosahují takových kvalit jako náhrady vytvořené individuálně pro každého pacienta.

Vzhledem k širokému výběru s nimi ale lze dosáhnout uspokojivého výsledku, a to i pomocí omezené úpravy tvaru, aby se více přizpůsobily pacientovi. Většinou slouží jako dočasná náhrada, než je vyrobena protéza na míru. Používají se také po operacích jako výztuhy a slouží k podpoře správného růstu a orientaci tkáně [4].

2 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE

K vytvoření prototypu bylo potřeba využít technologii Rapid Prototyping (RP), jejíž podstatou je opakované nanášení vrstvy materiálu (metoda aditivní) o konstantní tloušťce na rozdíl od obrábění, kdy se materiál odebírá (metoda subtraktivní). RP nabízí rychlou cestu, jak data získaná v CAD programu převést do podoby prototypové součásti, a zkracuje etapy vývoje produktu. Výsledné použití modelu je od začátku směřodatným faktorem pro výběr vhodné metody 3D tisku [9].

Vzhledem k požadavkům kladeným na technologii RP pro výrobu prototypu oční protézy, jako je schopnost vytvořit barevnou duhovku s žilkováním a průhlednou vrstvou na povrchu modelu, je technologie PolyJet v současnosti jedinou možnou volbou. Použitou tiskárnou v experimentální části byla Stratasys J750, proto se popis technologie PolyJet více zaměřuje na plnobarevné tiskárny, ačkoliv tuto technologii využívá více tiskáren od tohoto výrobce.

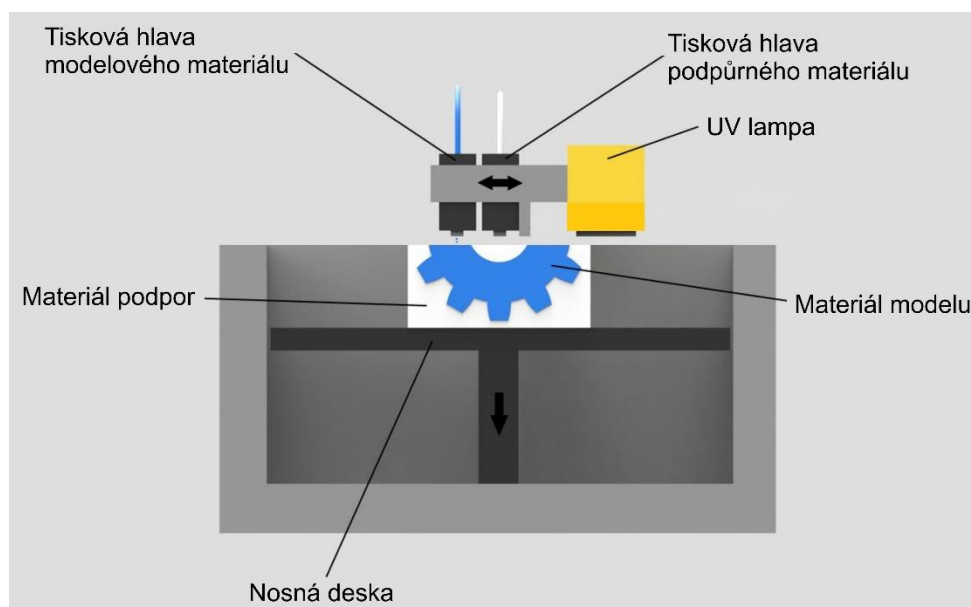
Existují srovnatelné technologie jako je např. Multi Jet Fusion od společnosti HP na principu termopolymerů. Ta ale neumožňuje tisk průhledného materiálu, který je při tisku prototypu nezbytný.

2.1 Technologie PolyJet™

PolyJet je zkratka pro Polymer Jetting. Tuto technologii vyvinula společnost Objet Geometries kolem roku 1998 a v roce 2000 uvedla na trh první tiskárnu s touto technologií. Od roku 2011 je součástí společností Stratasys Ltd. giganta na poli 3D tisku.

Tento druh aditivní technologie funguje obdobně jako inkoustové tiskárny. Obyčejné tiskárny vytváří obraz nanášením inkoustu na papír, zatímco PolyJet tiskárny nanášejí kapičky fotopolymerů, které jsou následně vytvrzeny UV světlem.

Tisková hlava s vysokým počtem trysek se pohybuje v osách X a Y a nanáší vrstvu fotopolymerů, která je okamžitě vytvrzena UV lampou. Po každém vytvrzení se nosná deska posune v ose Z o výšku jedné vrstvy a proces se opakuje. Zároveň s modelovým materiálem je nanášen také podpůrný materiál, který se po dokončení tisknutého objektu odstraní [10, 11].



Obr. 2.1 Schéma PolyJet technologie – podle [11].

Technologie PolyJet vyniká přesností a kvalitou povrchů u vytisknutých objektů díky velice nízké výšce nanášených vrstev. Další předností je široká škála tisknutelných materiálů a možnost barevného tisku. Nevýhodou je zejména vysoké množství odpadu z podpůrného materiálu [10, 11].

2.2 Tiskárny využívající PolyJet technologii

V současné době má společnost Stratasys v nabídce 19 tiskáren využívajících technologii PolyJet. Tiskárny mají různá specifická zaměření jako je např. plnobarevný tisk nebo dentální náhrady.

Nejpokročilejší z plnobarevných tiskáren je nyní Stratasys J750, která je čtvrtou generací tiskáren s touto technologií a byla uvedena na trh v roce 2016. Na začátku roku 2018 přibyla její zmenšená verze Stratasys J735 a zároveň proběhl upgrade staršího modelu. Původní gamut o 360 000 barvách byl rozšířen na 500 000 odstínů. Rozdíl mezi těmito tiskárnami je ve velikosti prostoru pro tisk.

Stratasys J750 nabízí prostor 490 x 390 x 200 mm a J735 350 x 350 x 200 mm. Cena Stratasys J750 je nyní přibližně 8 050 000 Kč [350 000 \$] a cena Stratasys J735 je to 6 900 000 Kč [300 000 \$] [12].

U těchto tiskáren je možné ve slotech pro materiály modelu umístit fotopolymery pro vytvoření barevného modelu CMYK (azurová – *Cyan*, purpurová – *Magenta*, žlutá – *Yellow* a černá - *Key*) a do dvou zbývajících míst bílý a transparentní. V dalších slotech mohou být umístěny aktuálně nepoužívané materiály a materiál pro stavbu podpor.



Obr. 2.2 Tiskárna Stratasys J750 [13].

Tiskárny mají tři módy tisku [13]:

- High Quality - vrstva 14 μm a až 6 druhů pryskyřic,
- High Mix - vrstva 27 μm a až 6 druhů pryskyřic,
- High Speed - vrstva 27 μm a až 3 druhy pryskyřic.

Při běžném plnobarevném tisku na tiskárnách s technologií PolyJet mohou být materiály nastaveny pouze jednotně pro celé tělo modelu anebo jako textura na vnějším povrchu. Vícebarevné výtisky s různými materiály v objemu tak byly tvořeny z několika modelů složených do sestavy.

Stratasys Ltd. ale v roce 2017 přidala do svých plnobarevných tiskáren rozšíření pro voxelový tisk, které zpřístupňuje možnost kontroly 3D tisku na úrovni voxelů. Voxel v počítačové grafice označuje částici objemu v pravidelné třídimenzionální mřížce, jde tak o analogii ke dvourozměrnému pixelu.

Tento způsob tisku umožňuje kontrolu materiálu a barev pro každý individuální bod v celém objemu tisknutého tělesa. Díky tomuto rozšíření se otevírá řada možností pro kombinování materiálů a vytváření komplexních struktur [14].

2.3 Materiály pro technologii PolyJet™

PolyJet technologie je unikátní pro svou širokou škálu materiálů a jejich vlastností. Vyniká také mezi ostatními aditivními technologiemi možnostmi vzájemné kombinace jednotlivých materiálů.

Materiály používané tiskárnami s PolyJet technologií jsou vyrobené z pryskyřic, které se skládají z monomerů a oligomerů. Materiály jsou dodávány v zapečetěných kazetách odolných proti UV záření, aby nedošlo k jejich znehodnocení. Kazety je třeba řádně skladovat a u již použitých náplní je nutné se vyvarovat vystavení světlu, to by vedlo k zvýšení viskozity a případnému ztuhnutí.

Jejich základní rozdělení podle použití je na podpůrné materiály a modelové materiály. Tiskárny mohou mít v zásobnících až 12 kazet modelového materiálu a až 4 kazety s podpůrným materiálem. Hmotnost jedné plné náplně je 3,6 Kg [15].

Gelové podpůrné materiály pro tiskárny s PolyJet technologií jsou navrženy, aby bezpečně udržovaly složité geometrické struktury během 3D tisku. Každý ze tří druhů podpůrného materiálu je určen pro dané typy tiskáren a liší se zejména odstranitelností vodní tryskou anebo rozpuštěním ve vodě [16].

Modelových materiálů je celá řada a každá skupina má své specifické zaměření. Některé jsou určené pro barevný tisk, jiné jsou navrženy tak, aby odpovídaly vlastnostem jiných klasických plastů a elastomerů. Pro medicínské použití tu pak jsou biokompatibilní materiály používané v oblasti dentálních náhrad.

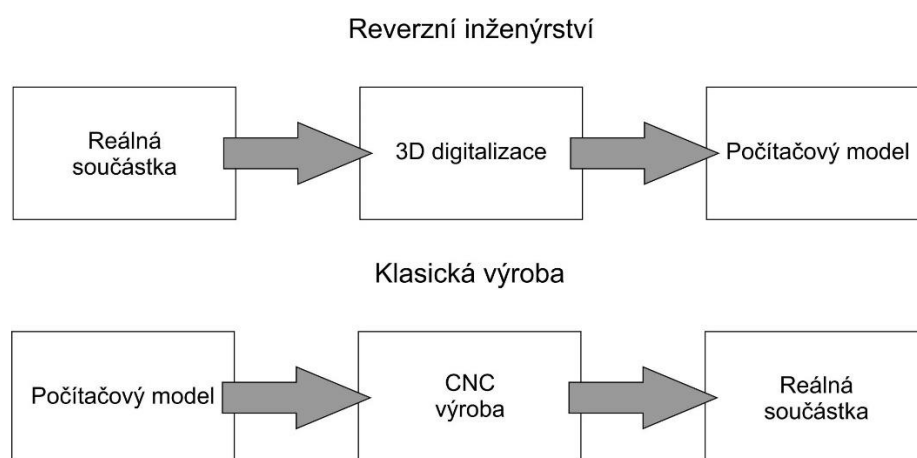
Příklady modelových materiálů [13, 17]:

- Vero Family - pevné barevné materiály, pro plnobarevné tiskárny,
- VeroClear - transparentní materiál vizuálně připomínající čirý akrylát,
- Durus Family - materiál podobný polypropylenu,
- Tango skupina [Tango Family] - gumové materiály,
- Digital materials – kombinace pevných a pružných materiálů
- Agilus30 – odolný a pružný gumový materiál,
- Digital ABS – materiál navržený tak, aby odpovídal standardnímu ABS,
- Digital ABS Plus – obdoba Digital ABS s vyšší odolností při nárazech,
- Dentální / biokompatibilní - materiály pro výrobu dentálních náhrad s možností kontaktu s kůží po dobu 24 hodin.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část této práce se zabývá postupem výroby estetické oční protézy aditivní technologií. Je zde popsán proces získávání modelu a jeho úpravy potřebné pro tisk. Vzhledem ke tvarové složitosti očních protéz by bylo vytvoření modelů standardním postupem prakticky nemožné, byly proto využity metody reverzního inženýrství.

Píška [2009] popisuje reverzní inženýrství takto: „*Reverzní inženýrství se vyznačuje opačným sledem činností vůči klasickému výrobnímu procesu obr. 3.1. V klasickém procesu vytváří konstruktér na základě podkladů návrh CAD virtuálního modelu součásti, který se stává předlohou pro výrobu fyzické součásti. V reverzním inženýrství stojí na počátku fyzický objekt, který je digitalizací převeden do podoby modelových dat, s nimiž může konstruktér dle potřeby dále pracovat pomocí systémů na zpracování dat.*“



Obr. 3.1 Proces reverzního inženýrství - podle [9].

Model akrylátové protézy již byl získán v rámci předchozí bakalářské práce a byl použit pro první pokusy o úpravy a tisk modelu. Pro rozšíření sady dostupných modelů a prověření opakovatelnosti úprav na jiném modelu byla naskenována také skleněná protéza. Proces skenování, úprav geometrie, mapování textur, optimalizace a vytváření dat pro voxelový tisk je popsán v následujících podkapitolách. Popis skenování protézy také dodává ucelenější náhled na řešenou problematiku. Postup pro zpracování akrylátové protézy byl totožný [2].

3.1 Skenování skleněné protézy

K získání modelu skleněné protézy byl použit skener ATOS Compact Scan 2M, který funguje na principu projekce pruhů světla. Dostupný skener a jeho příslušenství nabízí konfiguraci tří možných měřicích rozsahů. Pro každý rozsah je specifická konfigurace snímacích kamer a projektoru. Měřicí rozsah pak udává měřicí objem, ve kterém je možné objekt skenovat.

Skener pracuje se softwarem GOM Inspect, který je v základní verzi dostupný bezplatně ke stažení. Tento program mimo jiné slouží pro inspekci mraku bodů ve 3D a zpracování sítě umožňující tvarovou a rozměrovou analýzu. Kromě samotného skenování a úprav nasnímaných modelů je možné získaný model např. porovnat s CAD modelem [18].

Vzhledem k velikosti protézy byla zvolena konfigurace pro nejmenší dostupný objem, který je spolu s dalšími údaji uveden v tab. 2.1. Skener bylo nutné sestavit v požadované konfiguraci a zkalibrovat, tato kalibrace zabrala přibližně půl hodiny [19].

Tab. 3.1 Základní informace k použitému měřicímu rozsahu skeneru [2, 19].

| | |
|---|------------------|
| Měřicí objem | 125 x 90 x 90 mm |
| Vzdálenost měřicího bodu | 0,075 mm |
| Doporučené referenční body | Ø 1,5 mm |
| Měřicí vzdálenost | 570 mm |
| Úhel kamery | 25° |
| Ohnisková vzdálenost objektivu kamer | 35 mm |
| Ohnisková vzdálenost objektivu projektoru | 23 mm |

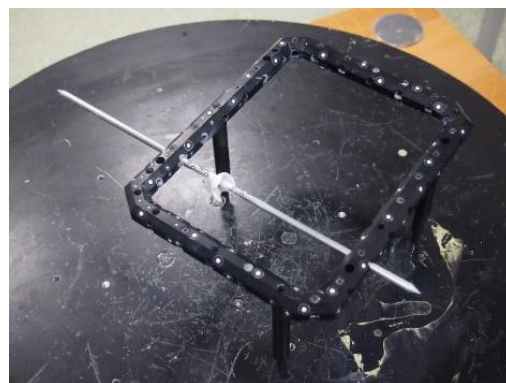
Před začátkem skenování byla protéza upnuta pomocí hrotů do referenčního rámečku. Na tupé konce hrotů byla umístěna modelovací hmota, aby se zamezilo poškození povrchu. Pozici v rámečku je nutné dostatečně zajistit tak, aby nedošlo ke změně relativní polohy vůči referenčním bodům během skenování. Tyto body slouží k provázání jednotlivých snímků a složení celého modelu. Referenční body jsou v tomto případě umístěny na rámečku, který byl doplněn o další body v okolí skenovaného objektu. Body byly také umístěny (nalepeny) i na samotné hroty. Použité body měly průměr 1,5 mm, což odpovídá zvolenému měřicímu rozsahu. Díky tomu, že referenční body nejsou přímo na protéze, omezí se vznik děr [Holes], které by bylo třeba na naskenovaném modelu dodatečně v softwaru uzavírat.

Protože skener nemůže snímat lesklé povrchy, je třeba úprava skenovaných ploch. Nejlépe se snímají povrchy bílé barvy, a proto se používá speciální křídový sprej. Tím byla nanесena na upnutou protézu vrstva sloužící k zmatnění jejího povrchu. Tento povlak musí mít dostatečnou tloušťku, aby bylo snímání úspěšné a v modelu tak nevznikly mezery. Tato vrstva by ale měla být co nejmenší, aby nedošlo ke zkreslení snímaného objektu. Křídový povlak je nanášen po jednotlivých vrstvách a v případě nutnosti je po zaschnutí předešlé vrstvy nanесena další. To se opakuje, dokud není zmatnění povrchu dostačující [19].

Po nanесení dostatečné vrstvy byl nežádoucí křídový povlak na rámečku a hrotech setřen. Pokud by nedošlo k jeho odstranění vzniklo by více naskenovaných ploch, které by bylo na konci skenování třeba odstranit. Současně byly také očištěny referenční body. Dalším využitým příslušenstvím skeneru byl rotační stůl, na kterém byla protéza spolu s rámečkem doplněným o podstavu umístěna.



Obr. 3.2 Skenování skleněné protézy.



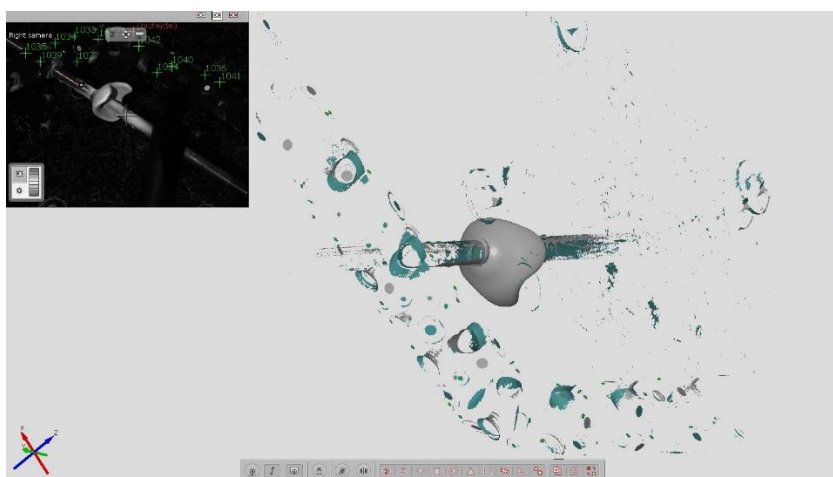
Obr. 3.3 Upnutí protézy v rámečku.

Digitalizace byla provedena dostatečným počtem skenů pro vytvoření modelu. Snímkování probíhalo v různých polohách skenovací hlavy vůči snímané protéze tak, aby v každém snímku obě kamery skeneru zaznamenaly požadovaná místa povrchu protézy. Toho bylo dosaženo postupnou rotací stolku do potřebných poloh a nakláněním rámečku s podstavami podle potřeby, aby došlo k naskenování všech dostupných ploch. Po každém skenu následovalo ustavení do nové polohy takové, aby bylo možné snímat ještě naskenované plochy.

Systém průběžně přiřazuje identifikační čísla novým bodům na skenech a ukládá si je do paměti. Pro správné umístění je přitom požadováno, aby skenovací hlavy zaznamenaly pokud možno 4 (minimálně 3) referenční body, které už jsou uloženy v systému. Podle potřeby byla také upravována intenzita promítaného světla.

Počet skenovacích snímků není omezen, avšak jejich počet je vhodné volit podle velikosti snímaného objektu, požadované kvality modelu a celkové časové náročnosti. S každým skenovacím krokem se dá pracovat samostatně (mazat nepotřebné, skrývat atd.) a všechny snímky jsou ukládány.

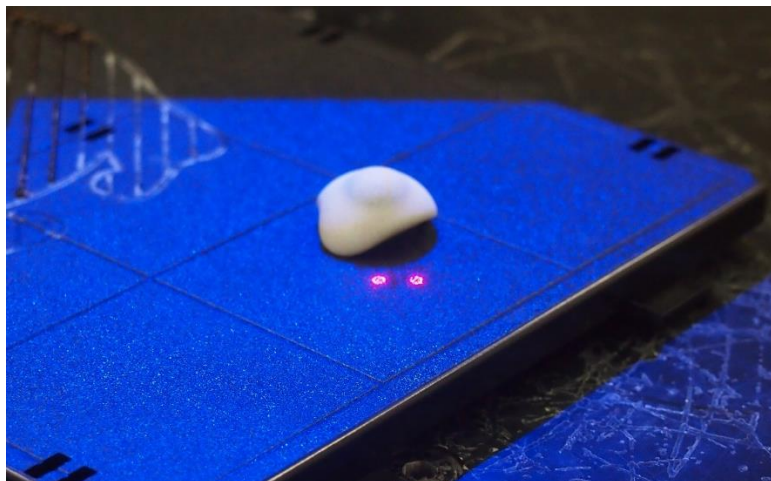
Skenování v rámečku bylo ukončeno ve chvíli, kdy už další změnou polohy nebylo možné dosáhnout rozšíření naskenované plochy. Spolu s povrchem protézy je vždy zachycena i část rámečku, hrotů pro upnutí a případného rušení okolí. Model po skenování při upnutí mezi hroty v rámečku lze vidět na obr. 3.4.



Obr. 3.4 Naskenovaný model skleněné protézy.

Z naskenovaných dat byly odstraněny všechny nežádoucí plochy. Model měl v této fázi dvě díry v oblastech kde se modelovací hmota na konci upínacích hrotů dotýkala protézy. Aby bylo možné chybějící plochy doskenovat, byla protéza vyjmuta z rámečku. Její povrch byl nejprve opláchnut a po osušení byla nanесena nová vrstva křídového prášku.

Protéza pak byla na podložce umístěna na rotačním stolku. Byla naskenována přední a po otočení zadní strana. Snímky pak na základě podobnosti tvarů software automaticky spojil s předchozím skenováním bez nutnosti použití referenčních bodů a tím bylo skenování ukončeno.



Obr. 3.5 Skenování protézy bez rámečku.

Na protéze se nacházelo v oblasti duhovky mechanické poškození v podobě drobného odštípnutí materiálu. Aby se tento defekt odstranil, došlo k vymazání odpovídajících polygonů a následně byla vzniklá díra uzavřena pomocí nástroje na opravu děr ve skenu. Vytvořená polygonální síť byla následně vyexportována ve formátu STL [STereoLithography] pro další úpravy. Celý proces skenování včetně kalibrace zabral přibližně 1,5 hodiny.

3.2 Geometrické úpravy modelu

Tvarové úpravy modelu probíhaly v programu 3ds Max 2019 od společnosti Autodesk Inc. a je nabízen zdarma k dispozici pro vzdělávací účely. Autodesk 3ds Max (dříve „3D Studio MAX“ a „3D Studio“) je velice účinným nástrojem při 3D modelování. Patří mezi nejrozšířenější softwary v oblasti animací a vizualizací. Své uplatnění najde hlavně při tvorbě vizuálních efektů, animací postav a vytváření počítačových her. Jeho další verze se používají pro architektonické a designové vizualizace. Pro tuto práci byl vybrán hlavně díky snadné manipulaci s modelem tvořeným ze sítě polygonů, kvůli nástrojům pro mapování textur a možnosti renderovat textury.

Před importem modelu bylo třeba zkontrolovat, zda jsou jako výchozí jednotky v programu nastaveny milimetry. Samotné importování modelu ve formátu STL bylo provedeno příkazem *import*, který se nachází v záložce *File*. Nastavení importu bylo ponecháno na výchozích hodnotách.

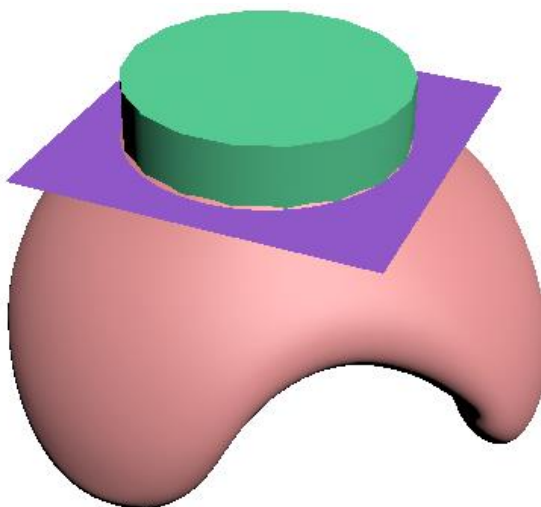
Příkazem *Select and Move* z lišty nástrojů byl model v globálním souřadném systému posunut do počátku. Následovala jeho rotace kolem všech třech os příkazem *Rotate*. Cílem bylo to, aby se osa Z shodovala se směrem pohledu původní skleněné protézy. Po dosažení vyhovujícího umístění byl projekt uložen.

Vzhledem k omezenému počtu zpětných kroků je dobré používat průběžné ukládání. Název souboru a modelů v něm umístěných by neměly obsahovat mezery a písmena s diakritikou. To by následně vyústilo v chybu při pokusu otevřít exportovaný soubor. Pro další operace s modelem byla také vytvořena kopie celého modelu.

Úpravy geometrie zadní části modelu vycházejí z postupu ruční výroby akrylátových protéz. Stejně jako u předchozí práce byla vytvořena na modelu kruhová plocha pro umístění textury duhovky. Tím je dosaženo zlepšení estetického výsledku finálního prototypu.

Přirozeným místem umístění plochy pro duhovku je oblast, ve které se nacházela na původní skleněné protěze. Vzhledem k nepravidelnosti protězy je velice obtížné dosáhnout přesného ustavení. Proto byl vytvořen válec o poloměru požadované plochy pro duhovku. Nástroj pro vytvoření válce a dalších jednoduchých objektů se nachází na pravé straně v panelu *Create* pod záložkou *Shapes*. Určení poloměru 6,25 mm proběhlo změřením duhovky na skleněné protěze. Tento rozměr byl pak následně po vzoru ruční výroby zmenšen o 0,25 mm, takže výsledný poloměr válce byl 6 mm. Válec byl pak posunut do vytipované oblasti.

Další pomůckou byla čtvercová plocha rovnoběžná s rovinou XY sloužící k nalezení vhodné výšky řezu v ose Z. Posunem plochy v této ose bylo možné kontrolovat výsledný tvar okraje řezu na modelu. Drobnými posuny válce v osách X a Y a jemnou rotací modelu protězy byla nalezena vyhovující poloha taková, aby se osa Z válce co nejvíce shodovala se směrem pohledu protězy.



Obr. 3.6 Ustavení modelu s válcem a plochou.

Pro další změny geometrie byl model transformován pomocí příkazu *Convert to Editable Poly*. Tím proběhl převod na polygonální síť, se kterou se dále snáze manipuluje.

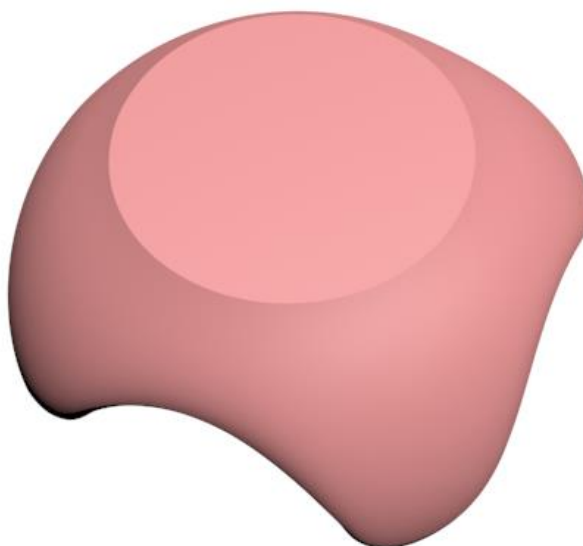
S objektem *Editable poly* se dá pracovat na pěti podúrovních [20]:

- vrcholy [Vertex],
- hrany [Edge],
- hranice [Border],
- polygony [Polygon],
- celý objektový blok [Element].

Prvním krokem bylo označení modelu a přepnutí se do panelu *Modify*. Tím se zobrazil seznam modifikátorů [Modifier List], který zobrazuje aktuálně prováděné operace. V nabídce *Select* byl zvolen *Element*, a tím byly vybrány všechny polygony modelu. Pomocí modifikátoru *Slice Plane* z nabídky *Edit Geometry* byla zobrazena řezná plocha, která byla rotována v lokálním souřadném systému takového, aby byla rovnoběžná s rovinou XY. Následně byla posunuta v Ose Z do souřadnic shodných s pomocnou plochou. Příkazem *Slice* při zaškrtnuté možnosti *Split* byl vrcholek modelu oddělen od ostatních polygonů. Tato část byla označena a zploštěna příkazem *Make Planar*.

Následoval její posun do požadovaných souřadnic v ose Z a příkazem *Scale* byla tato skupina polygonů zmenšena. To vytvořilo mezeru kruhovitěho tvaru mezi vytvořenou plochou a zbytkem modelu.

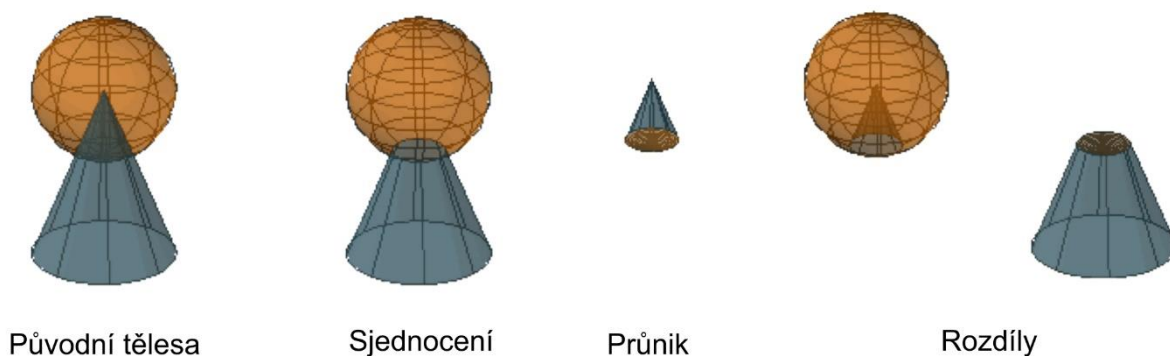
Následovalo označení vzniklých hranic na ploše a modelu. Příkazem *Bridge* z nabídky *Edit Borders* se vytvořil most z nových polygonů. Tímto postupem bylo dosaženo toho, že na obou stranách spojovaných hranic byl stejný počet vrcholů, ze kterých se pak vytvořily nové čtyřhranné polygony. Tato typická skupina polygonů pak výrazně usnadňovala mapování textur, jelikož byla snadno rozpoznatelná v jinak husté a nepřehledné polygonální síti.



Obr. 3.7 Model s kruhovou plochou.

Aby se dosáhlo přirozeného vzhledu byl tvar protézy upraven obdobně jako je tomu u ruční výroby akrylátových protéz. Textura duhovky a žilkování, ve výsledku barevný materiál, byla umístěna mezi průhlednou přední vrstvou s rohovkou a bílým materiálem tvořícím zadní část. Tomu také odpovídají následné geometrické úpravy modelu.

Vzhledem k složité a nepravidelné geometrii protézy byly na vytvoření požadovaného tvaru využity booleovské operace s tělesy, jejichž přehled je na obr. 3.8. A to průnik [Substract] a rozdíl [Intersect] [21].



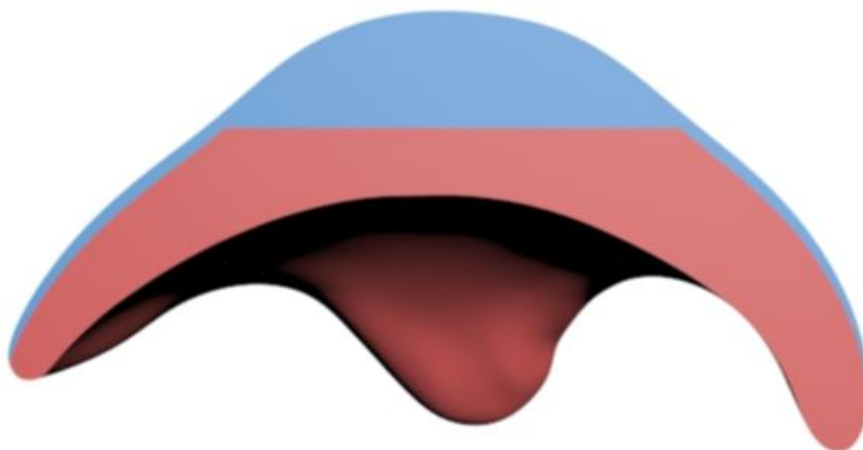
Obr. 3.8 Znázornění základních booleovských operací - podle [21].

Jako druhé těleso pro tyto operace byla použita kopie modelu vytvořená před zformováním plochy pro duhovku. Jejím posunutím v ose Z o 0,5 mm bylo dosaženo požadovaného rozložení. Při těchto operacích nesmí mít upravovaná tělesa společnou stěnu, abychom tento problém obešli a vytvořili požadovanou geometrii, byly oba modely v upraveném rozložení zkopírovány a skryty.

Z první dvojce modelů byla vytvořena zadní část modelu. Začátkem bylo označení svrchního posunutého modelu. V panelu *Create* bylo přepnuto na *Compound objects* a vybrán nástroj *ProBoolean*. Tlačítkem *Start Picking* proběhlo vybrání modelu s plochou pro duhovku a v nabídce *Parameters* byl zvolen průnik [Substraction]. Dodatečně bylo v nabídce *Advanced* pod záložkou *Planar Edge Removal* zvoleno *Remove only invisible*, to zabrání deformaci polygonů v ploše pro duhovku.

První pokus o provedení booleovské operace selhal. Po kontrole modelu nástrojem *xView* byla nalezena chyba v modelu v podobě skryté otevřené hranice kolem jednoho polygonu. To bylo odstraněno zvolením dvou vrcholů a jejich spojením.

Tato oprava proběhla u všech modelů a následně již úspěšně proběhl průnik těles. Stejný postup proběhl u druhé dvojce zkopírovaných modelů s tím, že byla zvolena operace rozdíl [Intersection]. Výsledek těchto úprav v řezu rovinou YZ je znázorněn na obr. 3.9. Zadní část byla pojmenována „back“ a přední „front“, u které byla následně prozatím vypnuta viditelnost.



Obr. 3.9 Řez modelem v ose YZ.

3.3 Vytvoření textur

Na vytvoření textury duhovky byla použita fotografie získaná v předchozí bakalářské práci. Tato fotografie byla pořízena pomocí štěrbínové lampy HAAG-STREIT BX 900 na Oční klinice ve Fakultní nemocnici Brno. Následně z ní byly v grafickém programu odstraněny odlesky a řasy. Z původní fotografie použité na předchozí prototyp byla vyříznuta jen oblast duhovky (viz obr. 3.10), díky tomu bylo eliminováno rušení pozadí, které bylo problematické během procesu optimalizace tisku.



Obr. 3.10 Obráz pro texturu duhovky [2].

Dalšími potřebnými texturami byly obrázky žilkování v oku. Soubory pro jejich vytvoření byly získány z několika zdrojů [22, 23, 24]. Získané obrázky byly v programu CorelDRAW 2018 pomocí funkce obrysového trasování převedeny na vektory. Díky tomu se smazaly rozdíly mezi rozlišením jednotlivých souborů. Výsledné křivky byly upraveny a některé žilky spojeny dohromady, aby tvořily ucelenější skupinu.



Obr. 3.11 Textury pro žilkování - podle [22, 23, 24].

Byla také upravena barva tak, aby měly všechny žilky stejný odstín červené. U některých byla barva upravena zesvětlením zakončení žilek, což by mělo mít pozitivní efekt na vzhled výsledného modelu. Pro vytvoření věrohodnějšího žilkování by bylo třeba více textur žilek, ale pro vyzkoušení možností použité technologie RP je počet vzorků dostačující.

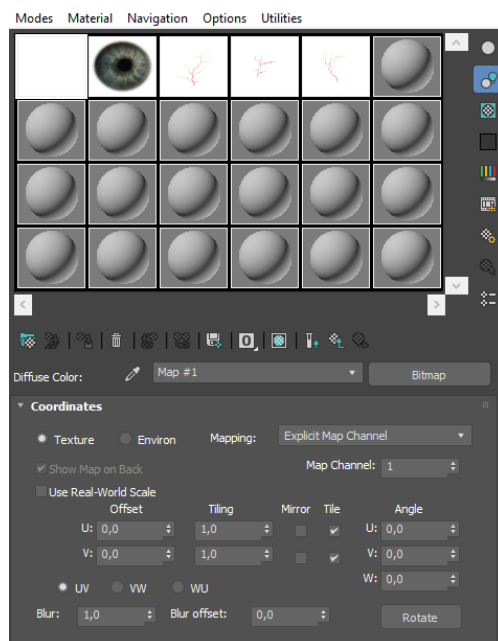
Všechny textury byly pro další použití vyexportovány ve formátu JPG s čistě bílým pozadím v RGB barevném modelu.

3.4 Mapování modelu a aplikace textur

Vytvořené textury bylo třeba umístit na požadovaná místa na povrchu polygonální sítě modelu. Za tímto účelem bylo v materiálovém editoru vytvořeno 5 materiálů. Tři materiály s žilkováním, jeden s duhovkou a materiál na zbytek pozadí, pro který byla použita čistě bílá textura.

Z hlavní nabídky v záložce *Rendering* byl spuštěn materiálový editor, konkrétně jeho verze *Compact Material Editor* (viz obr. 3.12), který je možné zapnout také

stisknutím klávesy M. Zde byly obrázky nahrány jako *Bitmap* pro *Diffuse Color* a postupně probíhala jejich aplikace na vybrané skupiny polygonů.



Obr. 3.12 Materiálový editor.

Po provedení příkazu *Convert to Editable Poly* a přepnutí možnosti výběru na polygony se automaticky vybrala skupina polygonů na svrchní straně modelu vzniklá během předchozích operací. To usnadnilo výběr polygonů, na které bylo třeba textury aplikovat. Jako první byla použita bílá textura na pozadí, aby se svým materiálovým ID odlišila oblast od zbytku modelu. To následně usnadnilo další práci s vybíráním polygonů. Materiálová ID se automaticky přiřazují vybraným oblastem po aplikaci nového materiálu na polygony. Vložení všech materiálů do editoru probíhalo stejně.

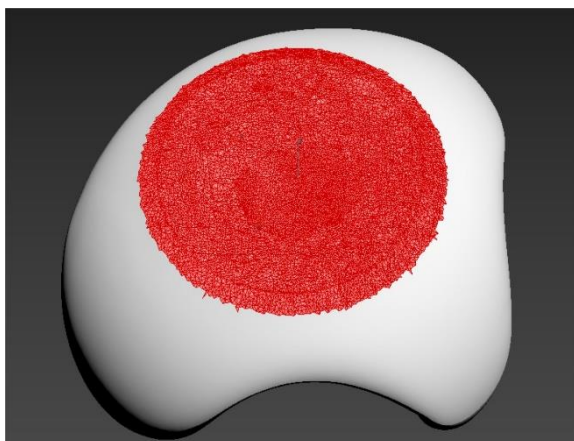
Pro zobrazení materiálů s texturou na modelu bylo třeba spustit jejich viditelnost v hlavní nabídce *Views*, kde pod záložkou *Show Materials in Viewport As* proběhlo zvolení možnosti *Realistic Materials with Maps*.

Druhou částí byla oblast pro duhovku. Abychom dosáhli požadovaného rozložení textury na vybrané skupině textur, bylo potřeba použít UV Mapování. To je název pro proces umístění textur na vybraná místa povrchu. „Mapovací souřadnice *U* a *V* určují směr, ve kterém bude textura zarovnána s modelem. Jde o analogii objektových souřadnic *X*, *Y*, avšak pro materiály (*UVW* odpovídá *XYZ*).“ [20].

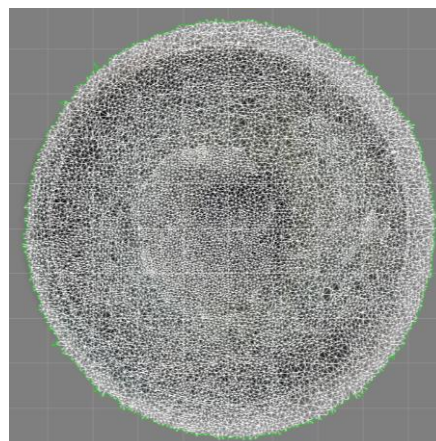
Prvním krokem bylo vybrání požadované oblasti v polygonální síti. Zde bylo využito toho, že se polygony dají vybírat i podle úhlu. Jelikož většina polygonů v oblasti určené pro duhovku svírá úhel 0° s rovinou *XY*, bylo označení cílové oblasti značně zjednodušené. Následně byla vybraná skupina ještě rozšířena mimo rovinnou plochu opakovaným použitím příkazu *Grow*, kdy se vždy do výběru přidá sousední polygon na požadovanou velikost (viz obr. 3.13). Tím, že byla vybrána takto zvětšená oblast, se zamezilo skokovému přechodu mezi texturou duhovky a bílým pozadím.

S takto označenou oblastí byl spuštěn modifikátor *Unwrap UVW*, který slouží k mapování komplexnějších povrchů. Pro účely rozložení textury je dostačující rovinná mapa [Planar Map], která byla zapnuta. V nabídce *Edit UVs* proběhlo spuštění editoru *UV Editor* a funkce *Quick Planar Map*. V tomto editoru se zobrazila UV mapa

(obr. 3.14) a jako pozadí příkazem *Pick Texture* byla nastavena textura s duhovkou. Pro usnadnění umístění textury byla zapnuta mřížka.



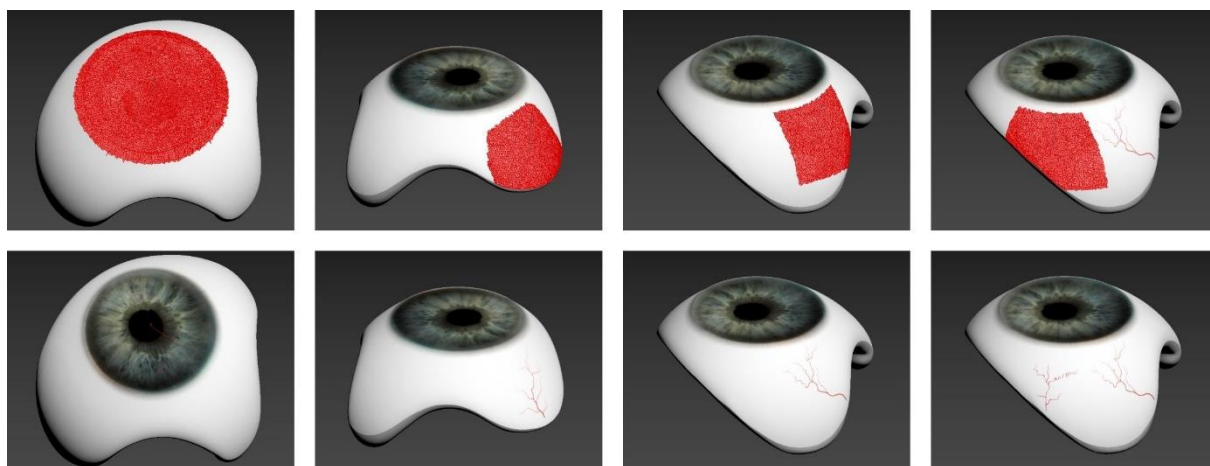
Obr. 3.13 Detail označené oblasti.



Obr. 3.14 UV Mapa výběru.

Této mapě byla změněna poloha posunutím *Move Selected Subobjects* a její velikost byla upravena příkazem *Scale Selected Subobjects*. Operace byly provedeny tak, aby kruhová oblast představující plochu pro duhovku byla umístěna na oblasti duhovky v bitmapě. Vzhledem k hustotě polygonální sítě a velikosti oblasti bylo optimální umístění obtížné, ale po dosažení vyhovující polohy byla vzniklá UV mapa uložena. Uzavřením editoru a příkazem *Convert to Editable Poly* byly uloženy všechny provedené změny.

Stejný postup mapování se opakoval i u zbývajících třech oblastí. Příkazem *Select ID* byly vybrány všechny zbývající polygony s texturou bílého pozadí a z tohoto výběru se odstranily nežádoucí oblasti. Výběr všech oblastí a výsledek jejich zmapování je zobrazen na obr. 3.15. Během mapování bylo třeba dávat pozor na to, aby nebyly barevné části s žilkováním umístěny v okraji, kde bude vrstva zdravotně nezávadného materiálu nejtenčí.

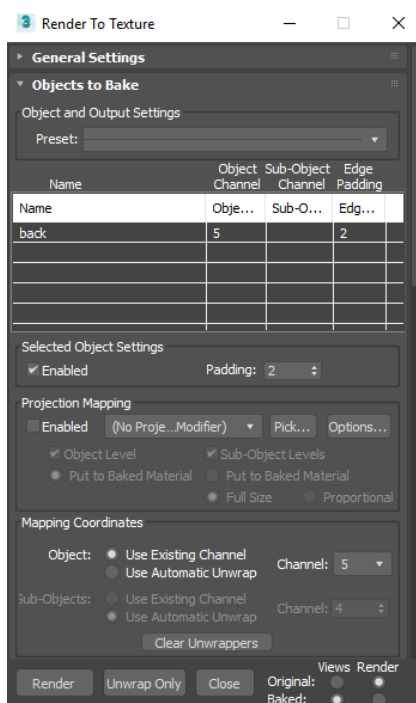


Obr. 3.15 Vybrané oblasti a zmapované textury.

Protože požadavkem pro následující proces optimalizace bylo, aby měl model pouze jednu texturu, na které by byl celý zmapovaný. Musely být všechny textury spojeny do jediného souboru.

Za tímto účelem proběhlo vytvoření ještě jedné UV mapy všech polygonů s texturou. Ty byly vybrány invertováním výběru zadní strany bez textury. Podstatnou změnou oproti přechozímu mapování byl jeho přesun na druhý kanál [*Channel*], který se dá v modifikátoru *Unwrap UVW* zvolit. Tím se tato mapa odsunula na jinou úroveň než čtyři předcházející. V editoru map pak byla použita funkce *Relax Until Flat* z nabídky *Reshape Elements*. Zploštění se projevilo zejména na okrajových oblastech mapy, kde byla velikost polygonů normalizována. Jinak byl postup vytvoření mapy totožný s ostatními.

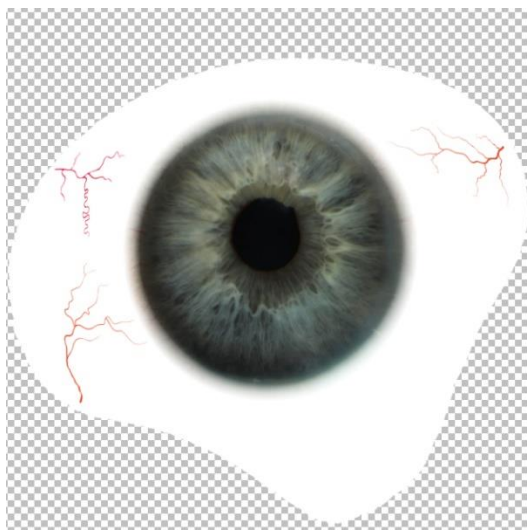
Následné vykreslování textury bylo provedeno za využití nástroje *Render to Texture* (viz. obr. 3.16), který se nachází v hlavní nabídce pod záložkou *Rendering*. Prvně byla vybrána cílová složka pro uložení vygenerované textury v nabídce *General Settings* v části *Output*. Následně byl nastaven použitý typ renderu v *Render settings*, kde byl vybrán *Scanline Renderer*.



Obr. 3.16 Nástroj *Render to Texture*.

V nabídce *Objects to Bake* v části *Object and Output Settings* byl zvolen vybraný model. V části *Mapping Coordinates* byl vybrán existující kanál map, který odpovídal zvolenému číslu kanálu mapy z předchozího kroku. V nabídce *Output* pak byl tlačítkem *Add* přidán prvek *DiffuseMap*. Následně zde byl také vybrán typ exportovaného souboru, a to PNG s 24bitovou barevnou hloubkou a 8bitovou průhledností tzv. alfa kanálem, zde proběhlo také zvolení rozlišení textury a jejího názvu. Posledním použitým příkazem před renderováním byl *Unwrap Only*, tím bylo zajištěno, že se vykreslí pouze polygony, které byly na daném kanálu zmapovány.

Výsledná textura po renderování je na obr. 3.17.



Obr. 3.17 Vytvořená textura.

S vykreslenou texturou byl založen nový materiál, který byl následně aplikován na celý model. V nastavení materiálu bylo třeba ještě změnit kanál pro UV mapy na odpovídající hodnotu. Posledním krokem bylo mapování polygonů zadní strany modelu. To probíhalo obdobně jako u předchozích textur s tím, že mapa byla umístěna v okrajové oblasti textury (viz obr. 3.17) na transparentní oblasti tak, aby jejich souřadnice odkazovali na alfa kanál. To umožňuje urychlení následujícího procesu optimalizace, kdy méně podstatným oblastem polygonů, jako je zadní strana, je přiřazena nižší priorita během výpočtu.



Obr. 3.18 Detail výsledku po umístění textury.

Posledním krokem v softwaru 3DS Max byl export modelu pro další zpracování. Požadovaným formátem byl .OBJ, známý také jako 3D Wavefront objekt file, který se používá pro trojrozměrná tělesa a nese informace o rozložení textur, kdy je textura uložena samostatně v daném formátu a materiál je definován v formátu .MTL.

Export zvoleného modelu byl spuštěn v hlavní nabídce *File*, a po zvolení formátu .OBJ a místa uložení následovala nabídka s pokročilými volbami. V části

Geometry bylo v *Faces*: vybrána možnost *Triangles* a v části *Material* proběhly volby týkající se uložení, rozlišení a formátu textury, zde volby odpovídaly předchozímu nastavení. Během procesu exportu proběhne výpis materiálů, které se ukládají, a je tak možné si zkontrolovat, zda na modelu nezůstal nežádoucí materiál. Stejný proces proběhl i s druhým modelem pojmenovaným „front“, kde ale nebylo třeba definovat exportovaný materiál [25].

3.5 Zpracování a optimalizace modelu

Při běžném plnobarevném tisku na tiskárnách s technologií PolyJet mohou být materiály nastaveny pouze jednotně pro celé tělo modelu anebo jako textura na vnějším povrchu. Vícebarevné výtisky s různými materiály v objemu tak byly tvořeny z několika modelů složených do sestavy. Pro vytisknutí prototypu, skládajícího se z přední průhledné části a zadní části s texturou v jednom celku, bylo třeba využít voxelového tisku. Ten umožňuje kontrolu materiálu a barev pro každý individuální bod v celém objemu tisknutého tělesa.

Na vytváření dat pro tento typ tisku zatím Stratasys Ltd. nenabízí žádný software, proto se využívají programovací prostředí a programovací jazyky jako C++, Python nebo Matlab. V těch je napsán program, který plní funkci Sliceru a rozdělí model na jednotlivé voxely. U zpracování modelu se zmapovanou texturou je jednotlivým voxelům následně přiřazena stejná barva jako měly polygony, ze kterých vznikly. Jednotlivé řezy jsou pak reprezentovány pomocí obrázků ve formátu .PNG nebo .BMP. V případě formátu .PNG je celá vrstva zobrazena v jednom barevném obrázku, kde každá barva reprezentuje jeden materiál. Zatímco vrstva s .BMP je rozdělena

do jednotlivých binárních souborů, kde každý odpovídá jednomu materiálu. Počet barev v .PNG a počet souborů v .BMP pak odpovídá módu tisku.

Je třeba, aby příprava dat pro tiskárnu Stratasys J750 dodržovala několik pravidel. Prvním je výška řezu v ose Z, která musí odpovídat výšce tisknuté vrstvy a to 0,014 mm nebo 0,027 podle módu tisku. Pokud není toto dodrženo, tiskárna může tento parametr kompenzovat přeskočením jednotlivých vrstev anebo jejich opakováním. Druhým je rozlišení, kde v ose X je požadováno 600 DPI a v ose Y 300 DPI [14, 26].

Díky spolupráci s Tobiasem Rittigem, B.Sc., M.Sc. a doc. Ing. Jaroslavem Křivánkem, Ph.D. z Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze bylo možné využít pokročilou metodu optimalizace tisku. Základy metody jsou popsány v článkách *Scattering-aware Texture Reproduction for 3D Printing* od Elek a kol. a *Geometry-Aware Scattering Compensation for 3D Printing* od Sumin a kol.

V článku *Scattering-aware Texture Reproduction for 3D Printing* se zaměřují na problematiku spojenou s nežádoucím rozptylem světla v objemu [cross-talk] mezi povrchovými body na 3D výtiscích. Tento jev vede ke ztrátě detailů a rozptí barev, a to zejména u vysoce průsvitných materiálů na bázi pryskyřic. Vzhledem k různým vlastnostem rozptylu u jednotlivých pryskyřic, závisí cross-talk na vnitřní struktuře objemu obklopujícího každý bod na povrchu.

Proto vytvořili kalibrační postup pro změření parametrů rozptylu daných materiálů a jejich kombinací. Na základě dat získaných pomocí obecné Monte-Carlo simulace heterogenního rozptylu a účinného numerického optimalizátoru dojde k rozložení materiálu více absorbujícího světlo v objemu tisku, a to zejména v blízkosti povrchu. Výsledkem je omezení nežádoucích projevů rozptylu [26].

Tento postup byl však omezen na rovinné výtisky, proto tuto metodu dále rozšiřují pro libovolně tvarované 3D objekty a ověřují správnost předpokladů v článku *Geometry-Aware Scattering Compensation for 3D Printing*.

Obr. 3.19 nabízí srovnání výsledku optimalizace cílového obrazu (a) s vytisknutými předměty, k jejichž tisku byl použit software tiskárny GrabCAD (b), komerčně dostupné rozšíření Cuttlefish (c) a navržená metoda optimalizace (d). Tento objekt byl 4 centimetry vysoký [27].



Obr. 3.19 Srovnání výsledků tisku [27].

Součástí iterativního postupu optimalizace je predikce vzhledu výtisku. Výsledný vzhled z poslední iterace modelu protězy je na obr. 3.22 a výsledek predikce tisku bez optimalizace je na obr. 3.21. Během procesu také došlo k spojení modelů „front“ a „back“ a přidání rovnoměrné vrstvy 0,12 mm transparentního materiálu kolem celého objemu. Tato vrstva slouží jako přídavek k finálnímu povrchovému zpracování broušením [27].



Obr. 3.20 Cílový obraz.



Obr. 3.21 Predikce tisku bez optimalizace.



Obr. 3.22 Predikce tisku s optimalizací.

Výsledkem optimalizace vytvořenou metodou jsou 3D výtisky s lepší kvalitou detailů a reprodukcí barev než u nejmodernějších dostupných ovladačů pro barevné 3D tiskárny. Výstupem z programu optimalizace byly data ve formátu .BMP. Z důvodu chyby v programu, který data generuje, nebylo možné vyexportovat jen jeden model. Proto jsou v datech vždy dva stejné modely vedle sebe a vždy došlo k tisknutí dvou výtisků zároveň. Nejde však o závažnou chybu, která by nešla později odstranit.

Je nutné upozornit na fakt, že materiály, pro které byly data naměřeny a se kterými proces optimalizace počítá, patří do skupiny *Vero Rigid Opaque* používané

v tiskárnách Stratasys. Bohužel v době tisku nebyl tento typ ve společnosti MCAE Systems k dispozici ve všech potřebných barvách.

Místo chybějících pryskyřic byly použity materiály ze skupiny *Vivid Colors*. Proto výsledek optimalizace na výtiscích nemusí dosáhnou svého plného potenciálu [26, 27].

3.6 Tisk prototypu

Samotný tisk probíhal na tiskárně Stratasys J750 ve společnosti MCAE Systems, s.r.o. a import dat byl proveden v softwaru GrabCad Print. Tento program kompatibilní s FDM i PolyJet tiskárnami je dostupný zdarma, ale jen se základními rozšířeními. Pro tisk s voxely je třeba mít navíc modul Voxel Print, který je již zpoplatněný. Tento nástroj odemyká možnost kontroly nad všemi materiály, jejich extruzí a tiskovou sekvencí na úrovni jednotlivých voxelů. Díky tomu je možné optimalizovat barevné gradienty, úroveň pružnosti a mapovat textury v mikroskopickém měřítku [28].

Rozšíření pro voxelový tisk nabízí dvě metody importování dat podle typu nahrávaných souborů ve formátu .BMP a novější .PNG. Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole metoda PNG používá jeden obrázek na vrstvu, ve kterém jednotlivé barvy odpovídají použitím materiálům. Oproti tomu u BMP metody je každá vrstva rozdělena do několika binárních obrazů. Každý z nich reprezentuje jeden materiál a výsledná tisknutá vrstva vznikne jejich složením. Celkový počet řezů pro všechny materiály musí být totožný. Pokud se materiál v dané vrstvě nevyskytuje, je reprezentován jen prázdným obrazem. Počet obrazů pro každou vrstvu odpovídá celkovému počtu použitých materiálů. Výstupním formátem z procesu optimalizace byly v tomto případě BMP soubory, takže následující popis postupu odpovídá této metodě [14].

Pro tuto metodu je navíc nutno vytvořit textový konfigurační soubor. Tento soubor byl vytvořen v poznámkovém bloku. Lze ho rozdělit do tří částí Build, Resin Type a Materials.

V sekci Build bylo třeba zvolit mód tisku, kdy číslo 2 odpovídá módu High Quality, 3 High Mix a 17 = High Speed. Následuje tloušťka vrstvy a to 0,027 mm nebo 0,014 mm. Tento rozměr musí odpovídat použitému módu tisku a šířce vrstvy vytvořené při převodu modelu na voxely. Posledním údajem je celkový počet řezů v modelu.

Část Resin Type obsahuje údaje o použitých barevných materiálech a materiálu podpor. Názvy musí přesně odpovídat jejich pojmenování v softwaru, které se může lišit oproti popisu uvedeném na štítku zásobníku. Počet uvedených materiálů odpovídá módu tisku, tedy 3 nebo 6 a to bez ohledu na to, zda jich pro tisk využijeme méně.

Ve třetí oblasti Materials je uvedena cesta k umístění zdrojových souborů, kdy pořadí jednotlivých barevných materiálů musí odpovídat pořadí v Resin Type. V cestě k souborům je počet řezů reprezentován písmenem x. V našem případě měla poslední vrstva číselné označení 0474 a na konci před příponou formátu je tedy čtveřice těchto symbolů [14].

Výsledný textový konfigurační soubor vypadal následovně:

```
[Build]
Format Version = 1;
Build Mode = 3;
Layer thickness = 0.027;
Number of slices = 544;

[Resin Type]
Support = SUP706;
Color = VeroPureWht;
Resin2 = VeroBlack;
Resin3 = VeroYL-V;
Resin4 = VeroClear;
Resin5 = VeroMGT-V;
Resin6 = VeroCyan;

[Materials]
Material1 = C:\bitmaps_cornea\white_xxxx.bmp
Material2 = C:\bitmaps_cornea\black_xxxx.bmp
Material3 = C:\bitmaps_cornea\yellow_xxxx.bmp
Material4 = C:\bitmaps_cornea\transparent_xxxx.bmp
Material5 = C:\bitmaps_cornea\magenta_xxxx.bmp
Material6 = C:\bitmaps_cornea\cyan_xxxx.bmp
```

Následně v programu GrabCad Print bylo třeba vybrat tiskárnu Stratasys J750 a spustit rozšíření pro voxelový tisk a v nástrojích přepnout na možnost vložit BMP soubory. Poté byl nahrán konfigurační textový soubor a proběhlo zpracování všech dat a vytvořil se nový soubor ve formátu .GCVF. Bylo také třeba upravit nastavení předvoleb na *Beta Features* a zkontrolovat nástroje *Katana Slicer* a *Voxel Print*.

Model pak již byl přidán do prostředí GrabCadu nahráním souboru .GCVF, kde je jeho geometrie reprezentována pomocí vygenerovaného .STL modelu s podobným tvarem. Následně jej stačí umístit na požadované místo s pracovním prostorem a spustit tisk [14].

První pokusy o tisk skončily neúspěchem zejména z důvodu špatného formátu názvů materiálů v konfiguračním souboru. Výsledkem bylo vytisknutí STL modelu jen ze základního bílého materiálu. Po opravě textového souboru již tisk probíhal podle očekávání. Pro každý vytisknutý model bylo třeba upravit počet vrstev na odpovídající číslo a změnit umístění souboru, jinak se textový konfigurační soubor neměnil. Všechny modely byly připraveny ve výšce vrstvy 0,014 i 0,027, ale vzhledem k značné časové vytíženosti tiskárny proběhly tisky pouze v rychlejším módu High Mix a výsledné vrstvy tedy měly výšku 0,027 mm.

Výsledkem byl tisk tří druhů prototypů. Prvním druhem byl prototyp na základě modelu akrylátové protézy, který sloužil jako první pokusný objekt. Pro ověření opakovatelnosti všech operací od skenování až po tisk byl vyroben prototyp na základě skleněné protézy. Třetím vytisknutým druhem byl prototyp podle modelu skleněné protézy, u kterého neproběhla optimalizace a který slouží k porovnání mezi optimalizovaným a neoptimalizovaným výtiskem.

Tab. 3.2 a tab. 3.3 uvádějí odhadované hmotnosti a časy tisku ze softwaru Grab Cad Print.

Tab. 3.2 Parametry tisku prototypu na základě akrylátové protézy.

| Mód tiskárny | High Quality | High Mix |
|---------------------|-------------------|----------|
| Doba tisku | 1 hodina 41 minut | 56 minut |
| Hmotnost modelu [g] | 24 | 18 |
| SUP706 [g] | 17 | 17 |
| VeroPureWht [g] | 9 | 8 |
| VeroBlack [g] | 3 | 2 |
| VeroYL-V [g] | 3 | 2 |
| VeroClear [g] | 3 | 2 |
| VeroMGT-V [g] | 3 | 2 |
| VeroCyan [g] | 3 | 2 |

Tab. 3.2 Parametry tisku prototypu na základě skleněné protézy.

| Mód tiskárny | High Quality | High Mix |
|---------------------|-------------------|----------|
| Doba tisku | 1 hodina 41 minut | 56 minut |
| Hmotnost modelu [g] | 24 | 18 |
| SUP706 [g] | 15 | 14 |
| VeroPureWht [g] | 9 | 8 |
| VeroBlack [g] | 3 | 2 |
| VeroYL-V [g] | 3 | 2 |
| VeroClear [g] | 3 | 2 |
| VeroMGT-V [g] | 3 | 2 |
| VeroCyan [g] | 3 | 2 |

Po vytisknutí modelů bylo třeba odstranit u všech prototypů materiál podpor (viz obr. 3.24), kde nejvíce objemu bylo odebráno manuálně a následně byla použita vodní tryska.



Obr. 3.23 Výtisky s podporami.



Obr. 3.24 Výtisk očištěný od podpor.

Povrch prvního prototypu na základě akrylátové protézy byl vyleštěn pomocí univerzální leštící pasty. I po proběhlé povrchové úpravě nebyl stav povrchu vyhovující, proto byl postup úprav pro další výtisky pozměněn.



Obr. 3.25 Leštění prvního výtisku.



Obr. 3.26 Vyleštěný prototyp.

Prvním krokem po očištění podpůrného materiálu vodní tryskou bylo broušení pomocí navlhčeného brusného papíru o hrubosti 1000 a následně 1500. Tím se odstranily zbylé pozůstatky podpůrného materiálu a došlo ke zjemnění povrchu. Zároveň se také vyhladily hrany od jednotlivých vrstev tisku. Na finální úpravu byl použit bezbarvý lak na plasty, který zahladil zbývající nerovnosti a zajistil lesklost povrchu.



Obr. 3.27 Nalakovaný prototyp na základě akrylátové protézy s optimalizací.



Obr. 3.28 Nalakovaný prototyp na základě skleněné protézy s optimalizací.



Obr. 3.29 Nalakovaný prototyp na základě skleněné protézy bez optimalizace.

Po vytisknutí a upravení povrchu všech modelů ze standardních pryskyřic přišla na řadu otázka využitelnosti biokompatibilního materiálu. Tiskárna umožňuje tisk z čirého zdravotně nezávadného materiálu MED610 a může také používat probarvené MED620, MED670 a MED690 [29].

Model byl připraven tak, aby kolem celého objemu byla tenká vrstva z transparentního materiálu určená k zabránění kontaktu mezi tkání a zdravotně závadným materiálem, ale k využití tohoto nachystaného řešení nedošlo.

Hlavním důvodem byla časová vyčíženost tiskárny. Před použitím biokompatibilního materiálu by bylo navíc nutné, pro zachování jeho zdravotní nezávadnosti, provést vyčištění trysek a přívodu materiálu, což je zdlouhavý a finančně nákladný proces.

I v případě, že by použití biokompatibilního materiálu při stavbě modelu proběhlo bez komplikací, jednalo by se pouze o neúplné řešení problému.

Materiál má sloužit pro výrobu dentálních náhrad a tím pádem není navržen a testován pro prostředí vyskytující se v očním důlku.

Další možný problém je spojen s povrchovou úpravou. V oblastech, kde je umístěno žilkování, je vrstva transparentního materiálu velice tenká. Při broušení tak hrozí její porušení a tím vystavení tkáně zdravotně závadnému materiálu.

Zesílení této vrstvy má své omezení, protože pokud by byla příliš silná, vedla by k nepřírozenému vzhledu protézy. S povrchovou úpravou také souvisí nedostupnost vhodného laku, který by zachoval biokompatibilitu materiálu.

Nemělo tak smysl trvat na vyzkoušení neúplného řešení, které by nevedlo k žádnému zásadnímu přínosu.

4 DISKUZE

Tato kapitola se zaměřuje na hodnocení provedeného postupu výroby prototypů estetických očních protéz a samotných prototypů. Věnuje se také návrhům na zlepšení budoucího postupu a využití technologie v současném stavu.

4.1 Zhodnocení vytvořených prototypů a provedených operací

Prototypy, zejména díky procesu optimalizace, dosáhly mimořádných vizuálních výsledků, které se pohybují na hranici možností použité aditivní technologie.

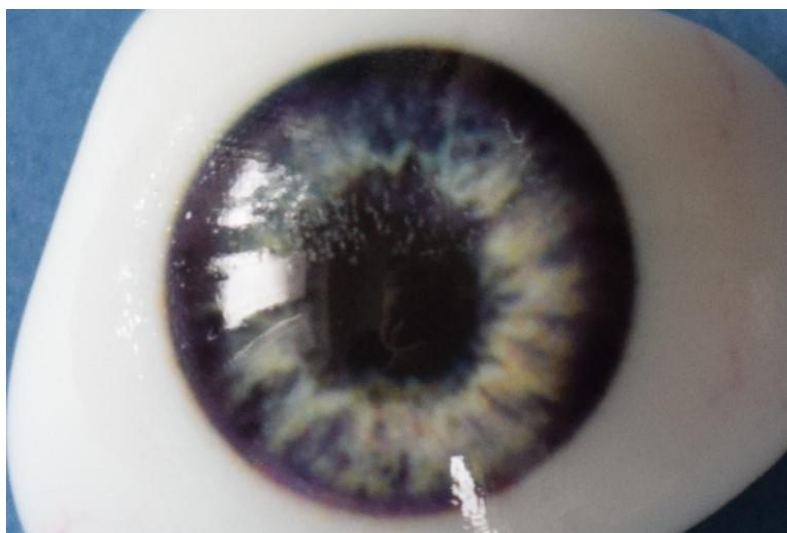
Oproti výsledku z předchozí práce se úspěšně povedlo vytisknout model i s žilkováním a výrazně detailnější oblastí duhovky, která vyniká zejména ostrostí.

Díky novějším materiálům, v tomto případě bílého *Vero Pure White*, je oblast bělma výrazně světlejší a výtisky tak působí přirozeněji.

Rozdíl mezi modelem, který prošel procesem optimalizace obr. 3.28 a modelem neoptimalizovaným obr. 3.29 je značný. Model bez optimalizace nenese žádné náznaky po žilkování a celá oblast duhovky je rozostřená.

V oblasti okraje duhovky zobrazeného na obr. 4.1, jsou vidět na všech prototypyech fialové odstíny. Prvním možným vysvětlením bylo prohození barev v zásobnících tiskárny. Po důkladné kontrole pořadí barev v konfiguračním souboru a v samotné tiskárně byla tato možnost vyloučena.

Druhým vysvětlením je použití skupiny *Vivid* materiálů namísto *Vero*. Jak již bylo zmíněno, proces optimalizace je založen na datech z měření rozptylu ve *Vero Rigid Opaque* materiálech. Proto při 3D tisku optimalizovaného modelu s jinými materiály není dosaženo maximálního potenciálu procesu optimalizace. *Vivid* materiály mají odlišné odstíny a jsou více průhledné, což vyústilo v popsanou vadu barev. Tento předpoklad potvrzuje fakt, že u výtisku bez optimalizace se tato oblast s fialovými odstíny nevyskytuje.



Obr 4.1. Detail fialového zabarvení na okraji duhovky.

Oblast duhovky je také tmavší než na predikovaném obraze, což je pravděpodobně také způsobeno použitím jiných materiálů.

Úspěšnost vytisknutí žilkování závisela zejména na jeho velikosti. Rozdíly v žilkování mezi jednotlivými výtisky je možné použít k určení vhodných rozměrů textur pro další prototypy a dosáhnout tak v budoucnu lepšího výsledku.

Povrchové zpracování za pomoci broušení a laku nebylo optimální, jelikož pod lakem, při bližším ohledání, jsou stále vidět náznaky vrstev z tisku. Vhodné by tak bylo vyzkoušet intenzivnější anebo ještě jemnější broušení. Další možností je kombinace leštění a lakování.

Pokud však porovnáme nové prototypy s výsledným prototypem z předchozí práce (viz obr 0.1) je vidět značný pokrok ve všech směrech výroby.

4.2 Ekonomické zhodnocení výroby prototypu

Celkové náklady na výrobu prototypů není možné vypočítat, protože během procesu byla využita řada nových nezavedených postupů.

Náklady, které je možné vyčíslit jsou skenování protézy a tisk prototypu. Hodinová sazba za využití skeneru je 2500 Kč, jak je uvedeno v kapitole 3.1 skenování trvalo 1,5 hodiny

$$C_s = T_s \cdot t_s \quad (4.1)$$

| | | | | |
|------|-------|----------|---|---------------------------------------|
| kde: | T_s | [Kč/hod] | - | sazba za hodinu skenování, |
| | t_s | [hod] | - | doba skenování, |
| | C_j | [Kč] | - | finanční náklady na skenování modelu. |

$$C_s = 2500 \cdot 1,5 = 3750 \text{ Kč}$$

V případě tisku je hodinová sazba za provoz tiskárny 500 Kč, modelovací materiál stojí za 11 Kč za gram a podpurný materiál je za 7 Kč za gram. Čas tisku prototypů byl 56 minut. Vždy probíhal tisk dvou prototypů, proto je třeba náklady vydělit 2. S použitím hodnot z tab. 3.2 je výpočet prototypu na základě akrylátové protézy následovný:

$$C_t = \frac{T_t \cdot t_t + C_m \cdot m_m + C_p \cdot m_p}{2} \quad (4.2)$$

| | | | | |
|------|-------|----------|---|-------------------------------------|
| kde: | T_t | [Kč/hod] | - | sazba za hodinu tisku, |
| | t_t | [hod] | - | doba tisku, |
| | C_m | [Kč/g] | - | cena 1 gramu materiálu modelu, |
| | m_m | [g] | - | hmotnost materiálu modelu, |
| | C_p | [Kč/g] | - | cena 1 gramu materiálu podpor, |
| | m_p | [g] | - | hmotnost materiálu podpor, |
| | C_t | [Kč] | - | finanční náklady na tisk prototypu. |

$$C_t = \frac{500 \cdot 0,93 + 11 \cdot 24 + 7 \cdot 17}{2} = 424 \text{ Kč}$$

Z výpočtu částky za tisk vyplývá, že více jak polovina finančních nákladů představuje provoz tiskárny. Při výrobě většího počtu kusů se ale cena tisku na kus výrazně snižuje.

Další proměnnou, je cena vyčištění tiskárny. To je třeba provést pouze v případech, kdy se měnily materiály. Vzhledem k tomu, že je při čištění vyplýváno velké množství pryskyřice, dosahuje částka až k 7 000 Kč. Plánováním výroby tak, aby

na sebe zakázky navazovaly a nebylo třeba materiály často měnit, je možné četnost čištění omezit [29].

Uvedená sazba je za běžný tisk a vzhledem k zpoplatnění rozšíření *Voxel Print Utility* částkou kolem 345 000 Kč [15 000 \$] ročně, lze očekávat nárůst ceny při využití voxelového tisku [12].

Úpravy modelu je také obtížné vyčíslit čas strávený úpravou modelu by se dal přepočítat na finanční náklady, ale k vytvoření byla využita licence programu Autodesk 3DS Max pro studijní účely. Při komerčním využití je potřeba zakoupit licenci, a to by se promítlo na výsledné ceně.

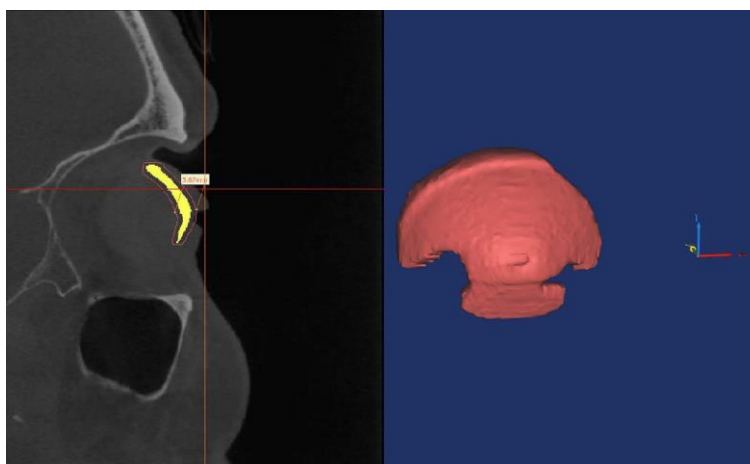
Nejpodstatnějším nákladem, který není možné určit, je optimalizace. Prozatím se jedná pouze o experimentální postup. Dá se ale očekávat, že obdobná metoda na zlepšení kvality tisku bude časem zapracována přímo do softwaru tiskárny.

Cena jedné skleněné protézy v České republice se pohybuje okolo 2 000 Kč a u akrylátových protéz je cena přibližně 2 900 Kč. Vyčíslit přesně cenu jednoho prototypu pro srovnání s tradiční výrobou nelze. Vzhledem k nutnosti použití specializovaného hardwaru a softwaru lze předpokládat, že výroba individuální protézy aditivní technologií je nákladnější než ruční výroba [2].

4.3 Návrh budoucího postupu výroby protéz 3D tiskem

První možností, která byla zvažována v rané fázi této práce pro vylepšení postupu výroby a rozšíření možností při přizpůsobení protézy vyrobené 3D tiskem na míru pacientovi, bylo využití otisku očního důlku. Voskový odlitek, vyrobený z otisku, by byl po potřebných úpravách naskenován a použit jako model při procesu výroby protézy aditivní technologií. Dva zapůjčené otisky důlků od protetiky, však byly protézy natolik tvarově vzdálené, že byly pro tento účel nepoužitelné. V případě získání vhodně upraveného otisku, by ale tento postup měl být aplikovatelný.

Další možností, jak získat model pro následné úpravy je CBCT [Cone Beam Computed Tomography] zobrazovací rentgenologické vyšetření, které zachycuje zvolený objem tkání ve 3D a umožňuje získat prostorový model vyšetřovaného objektu. Tento postup v oftalmologii úspěšně použili Ruiters a kol. při snaze nahradit metodu otisku očního důlku během výroby akrylátové protézy. Namísto získání tvaru pro výrobu protézy konvenčním způsobem, použili model z CBCT a ten vytiskli na 3D tiskárně Objet Connex350 3D z biokompatibilního materiálu MED 610. Podle výsledného tvaru byla vyrobena akrylátová estetická oční protéza [30].



Obr. 4.2 CBCT snímek a získaný model [30].



Obr. 4.3. Srovnání otisku očního důlku (vlevo) a vytištěného modelu (vpravo) [30].

Další oblastí, s možností dosažení zlepšení je žilkování, které na prototypch působilo značně plochým dojmem. Možným postupem pro budoucí pokusy je vymodelování celé žilkování, místo jednoduchého umístění textury na plochý povrch modelu. Tyto žilky by mírně vystupovaly z povrchu modelu v oblasti bělma a zasahovaly do průhledného materiálu. Tím by se mělo dosáhnout lepšího výsledného vzhledu a věrohodnosti protézy.

Nejvýznamnější nevyřešenou otázkou zůstává biokompatibilita, která je při současném výběru materiálů neřešitelná. V historii již bylo zaznamenáno, že se materiál pro výrobu dentálních náhrad začal, po patřičných úpravách, používat pro výrobu estetických očních protéz. Pravděpodobně jediným subjektem schopným nyní vyvinout takový materiál je Stratasys Ltd., která se v posledních letech značně zaměřuje na medicínský sektor, a proto by pro tuto společnost mohl být vývoj materiálu určeného na oční protézy zajímavý.

Na začátku roku 2019 předvedla společnost Stratasys Ltd. plnobarevnou tiskárnu Stratasys J720 Dental, zaměřenou na dentální modely, která sdílí možnosti barevných kombinací s tiskárnami J750 a J735. Zatím je známo jen málo detailů ohledně řešení biokompatibility u barevných dentálních protéz, ale uvedení takového produktu svědčí o zájmu společnosti Stratasys Ltd. investovat do medicínských aplikací s využitím aditivních technologií [31].



Obr. 4.4. Výtisk z tiskárny Stratasys J720 Dental [31].

4.4 Návrh využití současného postupu výroby

Možným využitím vytvořeného postupu je zaměření na nemedicínskou oblast. Oční protézy, v tomto případě je vhodnější označení reprodukce očí, mají své uplatnění i v jiných oborech. Velkou oblastí je výroba figurín, masek a vycpanin a zde pochopitelně není třeba řešit problémy se zdravotní nezávadností.

Aplikace se nemusí týkat jen na reprodukce lidských či zvířecích očí. Pro demonstraci možností tisku v této oblasti byl vytvořen ještě jeden prototyp určený pro výrobu Krampus masky zobrazený na obr. 4.5. Povrch jednoduchého dvoudílné modelu vytvořeného v CAD softwaru byl zmapován s použitím textury vytvořené podle zdroje [32] stejným způsobem, jako je popsáno v experimentální části.



Obr. 4.5 Návrh oka na výrobu masky.

Asi nejpodstatnější výhodou takovéto aplikace je rozložení nákladů. Finanční prostředky vynaložené na získání modelu, jeho úpravy a optimalizaci by byly jen jednorázového charakteru. Výsledná data pro tisk je možné neomezeně používat.

Stejně tak strojní čas je při přepočtu na kusy o poznání kratší. Zatímco tisk jedné dvojice modelů při módu tiskárny *High Mix* trval necelou hodinu, odhadovaný čas tisku 16 modelů uvedený v softwaru byl hodinu a čtyřicet minut.

V malých sériích by se tak daly značně snížit náklady na jeden kus a výrobky by mohly konkurovat současné nabídce [33].

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá výrobou prototypu estetické oční protézy na základě 3D modelu získaného skenováním akrylátové náhrady. Využívá poznatky z bakalářské práce *Návrh a výroba oční protézy 3D tiskem* a aplikuje je na výrobu pokročilejšího prototypu za použití aditivní technologie PolyJet. Práce se také věnuje možnosti využití dostupného biokompatibilního materiálu.

Teoretická část práce popisuje historii, vývoj a současný postup výroby skleněných a akrylátových estetických protéz.

Součástí práce je také charakteristika použité aditivní technologie PolyJet, tiskáren, které tuto technologii využívají, a dostupných materiálů.

Experimentální část práce nabízí ucelený pohled na proces výroby prototypu. První pokusy s úpravou geometrie, mapováním textur, optimalizací a voxelovým tiskem byly provedeny na modelu získaném skenováním akrylátové protézy. Pro rozšíření sady modelů a ověření opakovatelnosti celého procesu byla naskenována skleněná estetická protéza. Na vytvořeném modelu je vysvětlen celý proces výroby, kterým prototyp prošel. Pro srovnání výsledků byl také vytvořen prototyp bez optimalizace tisku.

Vytisknutí prototypů bylo realizováno na tiskárně Stratasys J750 se softwarovým doplňkem pro voxelový tisk a prototypy prošly povrchovou úpravou.

V diskuzi jsou následně prototypy vyhodnoceny z estetického hlediska a navrhnuty možné budoucí úpravy pro dosažení lepšího výsledku. Problematickým krokem bylo ekonomické vyhodnocení, u kterého z důvodu využití experimentálních a zatím v praxi okrajově využívaných postupů, nebylo možné vyhodnotit cenu výroby prototypu. Na konci diskuze je z důvodu nedosažení biokompatibility prototypu navrženo alternativní využití vytvořeného postupu.

Závěrem lze konstatovat, že všechny cíle diplomové práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *3d printing in medicine: a practical guide for medical professionals* [online]. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017 [cit. 2019-05-24]. ISBN 978-3-319-61922-4.
- [2] VOCÍLKA, Ondřej. *Návrh a výroba oční protézy 3D tiskem*. Brno, 2017, 38 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
- [3] DÜRROVÁ, Andrea. *Oční protetika - indikace k užití očních protéz* [online]. Brno, 2007 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/rtp8s/>. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Lékařská fakulta. Vedoucí práce Sylvie Petrová.
- [4] KLUSOŇOVÁ, Lucie. *Oční protézy* [online]. Brno, 2015 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/cvflf/>. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Lékařská fakulta. Vedoucí práce Sylvie Petrová.
- [5] TOŠOVSKÁ, Dagmar. *Oční protézy* [online]. Brno, 2007 [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/t54a2/>. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Lékařská fakulta. Vedoucí práce Jan Richter.
- [6] SAJJAD, Arbaz. *Ocular Prosthesis: A Simulation of Human Anatomy: A Literature Review* [online]. b.r. [cit. 21.05.2017]. Dostupné z: http://www.cureus.com/articles/1356-ocular-prosthesis---a-simulation-of-human-anatomy-a-literature-review#.VDWBO_1_u2B
- [7] PINE, Keith, Brian SLOAN a Robert JACOBS. *Clinical Ocular Prosthetics* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2015 [cit. 2017-05-01]. ISBN 978-3-319-19057-0. Dostupné z: <http://www.springer.com/it/book/9783319190563>
- [8] WALDHEGEROVÁ, Lucie. Oční protézy. *Česká oční optika*. 2006, **47**(2), 44-46.
- [9] PÍŠKA, M. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [10] KILLI, Steinar. *Additive Manufacturing: Design, Methods, and Processes*. Danvers USA: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 2017. ISBN 978-981-4774-16-1.
- [11] Polyjet (Objet). *The Technology House* [online]. b.r. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.tth.com/3d-printing/objet-prototyping/>
- [12] STRATASYS SUPPORT CENTER, . *Konzultace ceny softwaru a tiskáren*. [emailová konzultace]. Brno, 2019.
- [13] *Stratasys* [online]. Eden Prairie: Stratasys, 2017 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/>
- [14] Guide to Voxel Printing. *GRABCAD* [online]. 2018 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://help.grabcad.com/article/230-guide-to-voxel-printing?locale=en>
- [15] *Stratasys J750/735 User Guide* [online]. In: . Stratasys Ltd., 2018, s. 128 [cit. 2019-05-02].
- [16] PolyJet Support Materials. *Stratasys* [online]. b.r. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://support.stratasys.com/materials/polyjet-materials/polyjet-support-materials>
- [17] PolyJet 3D Printing Materials. *Purple Porcupine* [online]. 2019 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://purpleporcupine.com/materials/polyjet-materials/>
- [18] GOM Inspect. *MCAE* [online]. b.r. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/produkty/gom-inspect/>

-
- [19] ÚSTAV AUTOMOBILOVÉHO INŽENÝRSTVÍ VUT FSI, . *Skenování s 3D skenerem* [online]. Brno: I, b.r. [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <http://www.iae.fme.vutbr.cz/userfiles/ramik/files/Studium/Podklady%20ke%20studiu/3D%20skenov%C3%A1n%C3%AD/E-learning-Skenovani%203D%20skenerem.pdf>
- [20] KRÍŽ, Jan. *Mistrovství v 3ds Max*. Brno: Computer Press, a.s., 2010. ISBN 978-80-251-2464-2.
- [21] Množinové operace. <https://www.fce.vutbr.cz/> [online]. Brno, b.r. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.fce.vutbr.cz/studium/materialy/autocad/acad_3d/upravy/Boolean.html
- [22] Human red eye veins set, anatomy blood vessel arteries illustration group. Vector medical eyeball vein arteries system map. Veins isolated on white background - Illustration. *IStock* [online]. b.r. [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://www.istockphoto.com/vector/human-red-eye-veins-set-anatomy-blood-vessel-arteries-illustration-group-vector-gm697256312-129167677>
- [23] Set of human eye veins, red blood vessels, blood system. Vector illustration isolated on white background. *Adobe Stock* [online]. b.r. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://stock.adobe.com/hu/images/set-of-human-eye-veins-red-blood-vessels-blood-system-vector-illustration-isolated-on-white-background/91648143>
- [24] Set of human eye veins, red blood vessels, blood system. Vector illustration on white background. *Dreamstime* [online]. b.r. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <https://www.dreamstime.com/stock-illustration-set-human-eye-veins-red-blood-vessels-blood-system-vector-illustration-white-background-image59602287>
- [25] Wavefront OBJ. *Blue Marble Geographics* [online]. b.r. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: https://www.blumablegeo.com/knowledgebase/global-mapper-20-1/Formats/Wavefront_OBJ.htm
- [26] ELEK, Oskar, Denis SUMIN, Ran ZHANG, Tim WEYRICH, Karol MYSZKOWSKI, Bernd BICKEL, Alexander WILKIE a Jaroslav KŘIVÁNEK. Scattering-aware texture reproduction for 3D printing. *ACM Transactions on Graphics*. 2017, **36**(6), 1-15. DOI: 10.1145/3130800.3130890. ISSN 07300301. Dostupné také z: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=3130800.3130890>
- [27] SUMIN, Denis, Tobias RITTIG, Vahid BABAEI et al. Geometry-Aware Scattering Compensation for 3D Printing. *ACM Transactions on Graphics*. 2019-07, **38**(4), 1-14. DOI: 10.1145/3306346.3322992.
- [28] Software GrabCAD Print a GrabCAD Voxel Print. *MCAE Systems* [online]. Kuřim, 2018 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/software-grabcad-print-grabcad-voxel-print/>
- [29] MCAE SYSTEMS, s.r.o., *Konzultace materiálu*. [osobní konzultace]. Kuřim, b.r.
- [30] RUITERS, Sébastien, Yi SUN, Stéphan DE JONG, Constantinus POLITIS a Ilse MOMBAERTS. Computer-aided design and three-dimensional printing in the manufacturing of an ocular prosthesis. *British Journal of Ophthalmology*. 2016, **100**(7), 879-881. DOI: 10.1136/bjophthalmol-2016-308399. ISSN 0007-1161. Dostupné také z: <http://bjo.bmj.com/lookup/doi/10.1136/bjophthalmol-2016-308399>
- [31] STRATASYS J720 DENTAL BRINGS FULL-COLOR ULTRA-REALISTIC MODELS TO DENTAL INDUSTRY. *3D PRINTING IDUSTRY* [online]. b.r. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/stratasys-j720-dental-brings-full-color-ultra-realistic-models-to-dental-industry-149616/>
- [32] Sauron, Lord Of The Rings, Eye, Orange, Close Up PNG image with transparent background. *Kisspng* [online]. b.r. [cit. 2019-03-21]. Dostupné z:
-

<https://www.kisspng.com/png-sauron-the-lord-of-the-rings-evil-eye-3356922/download-png.html>

- [33] Eye Products. *Tech Optics Eyes* [online]. b.r. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <http://www.tech-optics.com/products>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Symbol | Jednotka | Popis |
|---------|----------|--------------------------------------|
| C_m | [Kč/g] | Cena 1 gramu materiálu modelu |
| C_p | [Kč/g] | Cena 1 gramu materiálu podpor |
| C_s | [Kč] | Finanční náklady na skenování modelu |
| C_t | [Kč] | Finanční náklady na tisk prototypu |
| m_p | [g] | Hmotnost materiálu podpor |
| m_s | [g] | Hmotnost materiálu modelu |
| T_s | [Kč/hod] | Sazba za hodinu skenování |
| t_s | [hod] | Doba skenování |
| T_t | [Kč/hod] | Sazba za hodinu tisku |
| t_t | [hod] | Doba tisku |
| Zkratka | - | Popis |
| 2D | - | Dvoudimenzionální |
| 3D | - | Trojdimenzionální |
| ABS | - | Acrylonitrile Butadiene Styrene |
| CAD | - | Computer-aided design |
| CBCT | - | Cone Beam Computed Tomography |
| PMMA | - | Polymethylmethakrylát |
| RP | - | Rapid Prototyping |
| UV | - | Ultra Violet |